



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura

Helena Coracini Garcia

**Materiais de Mudança de Fase (PCM) Aplicados em Painéis Solares:
Perspectivas e Desafios**

Trabalho de Conclusão de Curso

São Carlos
18 de Junho de 2018

Helena Coracini Garcia

**Materiais de Mudança de Fase (PCM) Aplicados em Painéis Solares:
Perspectivas e Desafios**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Aparecido Chinellato

São Carlos
18 de Junho de 2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C474m Coracini Garcia, Helena
Materiais de Mudança de Fase (PCM) Aplicados em Painéis Solares: Perspectivas e Desafios / Helena Coracini Garcia; orientador Marcelo Aparecido Chinelatto. São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Materiais de Mudança de Fase. 2. Painéis Fotovoltaicos. 3. Energia Solar. 4. Controle de Temperatura. 5. Célula Solar. 6. Sustentabilidade. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Helena Coracini Garcia
Título do TCC: Materiais de Mudança de Fase (PCM) Aplicados em Painéis Solares: Perspectivas e Desafios
Data de defesa: 18/06/2018

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Marcelo Aparecido Chinelatto (orientador)	Aprovado
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Íris Bento da Silva	APROVADO
Instituição: EESC - SEM	
Professor Associado Antonio José Félix de Carvalho	Aprovado
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Marcelo Aparecido Chinelatto**



(assinatura)

Dedico este trabalho a todos aqueles que buscam sua luz no meio do caos e se esforçam todos os dias para melhorar e evoluir.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Marcelo Aparecido Chinelatto pela oportunidade de desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso, pela orientação e confiança depositada em mim.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo que possibilitou o desenvolvimento do trabalho.

A todos os meus professores por todos os ensinamentos e lições ao longo da minha graduação, em especial aos pacientes membros da minha banca de TCC, Profs. Drs. Antonio José Félix de Carvalho e Íris Bento da Silva.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da University of Birmingham que me ensinou muito sobre novos temas e motivou o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais, Rosana e Assis, por todo o amor, suporte, educação e incentivo que me proporcionaram ao longo da minha vida.

E a todos os meus amigos por toda a ajuda, conselhos, carinho e paciência.

Muito obrigada!

“Quantas vezes você despencou até cair em si?”

- Eu me Chamo Antônio

Resumo

GARCIA, H.C. **Materiais de Mudança de Fase (PCM) Aplicados em Painéis Solares: Perspectivas e Desafios**. 2018. 64 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A cada hora, a energia solar incidente na superfície terrestre é suficiente para suprir a demanda mundial durante um ano. Alguns desafios na área hoje impedem que seja cada vez mais viável o uso de energia solar por células fotovoltaicas, tais como as temperaturas ambiente e de operação do painel, o material da célula fotovoltaica e a orientação do painel ao ângulo da incidência solar. Ao atingir uma célula solar, apenas uma fração da radiação solar incidente é convertida em energia elétrica, enquanto a outra parte se dissipará na forma de energia térmica. Quando os painéis solares alcançam uma temperatura de operação elevada, sua vida útil e sua eficiência são reduzidas. Neste trabalho foram abordados os efeitos do aumento da temperatura no painel solar, bem como meios de se controlar esse comportamento da temperatura por meio de técnicas comumente usadas atualmente por sua simplicidade, tais como circulação natural ou forçada de água ou ar, e técnicas emergentes mais sofisticadas, como o uso de materiais de mudança de fase (PCM). Será feito um aprofundamento na literatura sobre os sistemas compostos pelo painel solar e os materiais PCM quanto aos aspectos da tecnologia, seleção de materiais, avaliação de performance, meios de se melhorar a transferência de calor do PCM, aplicações práticas e limitações. Como se visa à viabilidade econômica dos módulos solares, também foi discutido o uso de painéis solares integrados a PCMs e a meios de extração e utilização do calor gerado pela energia solar. Observou-se através de revisão de artigos relacionados que o uso de PCMs melhora a eficiência do sistema, mesmo que menos que outras técnicas, porém, por seu uso simples, é altamente recomendado.

Palavras-chave: Materiais de Mudança de Fase, Painéis Fotovoltaicos, Energia Solar, Controle de Temperatura, Célula Solar, Sustentabilidade.

Abstract

GARCIA, H.C. **Phase Change Materials Applied in Solar Panels: Perspectives and Challenges**. 2018. 64 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Every hour, enough sunlight strikes the Earth's surface to supply electricity for the whole world during an entire year. However, some challenges in the area hinder the use of solar cells, such as ambient temperature, required low operating temperature of the panel, solar cell materials, and orientation of the panel towards the sun rays. When the sunlight hits a solar cell, only a fraction of it gets converted in electricity, whilst the rest will be dissipated into thermal energy. When solar panels reach a high operating temperature, their life and efficiency are reduced. This work approached the effects of temperature rise on the panel, ways to control this behavior using common simple techniques, such as natural and forced air and water flow, and using more sophisticated new technologies, such as the use of phase change materials (PCM). More details were provided from the literature about solar systems containing the solar panel and the PCM regarding technology aspects, materials selection, performance evaluation, improvement of heat transfer to and from the PCM, practical applications and limitations. Given that the feasibility and applicability of the solar panels is an important topic, this work also approached means of extraction and use of the generated heat in the PCM in order to employ as much as possible of the solar energy. It has been observed that the use of PCM doesn't improve system efficiency as much as other mentioned techniques, but since its implementation is very simple, it is highly recommended.

Keywords: phase change materials, photovoltaic panels, solar energy, temperature control, solar cells, sustainability.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tendências de publicações escritas das palavras “energia solar”, “fotovoltaico”, “sustentabilidade” e “energia renovável”.	17
Figura 2 – Cenário brasileiro quanto a fontes de energia em 2016.	18
Figura 3 – Representação dos calores sensível e latente em um ciclo de aquecimento.	21
Figura 4 – Processo de fusão e solidificação.	22
Figura 5 – Classificações dos tipos comuns de PCMs.	23
Figura 6 – Eficiências encontradas nos módulos testados versus a temperatura dos painéis em °C.	25
Figura 7 – Efeito fotovoltaico em um semicondutor de silício. Em azul, o semicondutor tipo P, e em vermelho o tipo N.	27
Figura 8 – Zona de depleção formando campo elétrico no semicondutor.	27
Figura 9 – Tecnologias de aproveitamento de energia solar.	28
Figura 10 – Parâmetros de uma fachada ventilada durante a) verão, b) inverno.	30
Figura 11 – Comportamento médio observado por hora do dia da temperatura e da eficiência dos módulos com (tom mais claro) e sem ventilação (mais escuro).	31
Figura 12 – Comparação das temperaturas com o filme d’água e sem.	33
Figura 13 – Comparação das eficiências de conversão de energia com o filme d’água e sem.	34
Figura 14 – Arranjo proposto por Earle (2009).	35
Figura 15 – Perfis horários de temperatura para o fluxo natural de ar para dois tipos de sistemas PV. Aqui _REF se refere ao sistema de referência e _FIN ao sistema com aletas.	36
Figura 16 – Perfis horários de temperatura para o fluxo forçado de ar para dois tipos de sistemas PV. Aqui _REF se refere ao sistema de referência e _FIN ao sistema com aletas.	36
Figura 17 – Desenho comum de um painel integrado a um PCM.	38
Figura 18 – Resultados obtidos de a) temperatura e b) potência no sistema com e sem PCM por hora do dia.	39
Figura 19 – Comparação da temperatura média por tempo para paredes de alumínio e de cobre.	41
Figura 20 – Os quatro sistemas PV-PCM variando espessura do PCM e condutividade do contêiner.	42
Figura 21 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de Perspex.	43

Figura 22 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de alumínio.	44
Figura 23 – Comportamento do número de Rayleigh reduz quanto menor o intervalo entre aletas no sistema.	45
Figura 24 – Comportamento da temperatura por tempo versus o número de aletas no sistema.	46
Figura 25 – Esquema dos pontos de medição da temperatura.	47
Figura 26 – Resultados de temperatura por tempo no sistema sem aletas.	47
Figura 27 – Resultados de temperatura por tempo no sistema com aletas espaçadas a cada 8mm.	48
Figura 28 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de 3 cm de espessura.	49
Figura 29 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de 5 cm de espessura.	49
Figura 30 – Entalpias de fusão de PCMs versus suas temperaturas de fusão.	52
Figura 31 – Principais temperaturas de fusão de PCMs.	53
Figura 32 – Dados de PCMs comuns no mercado e seus fornecedores.	55
Figura 33 – Representação dos desempenhos (em kWh/dia) do PV e do ST associados em um mesmo sistema em função do aumento da condutância do PCM.	56
Figura 34 – Esquema convectivo do PV-ST-PCM proposto por Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011).	58

Lista de tabelas

Tabela 1 – Os 10 países com maior capacidade de geração de energia solar instalada em 2016.	19
Tabela 2 – Os 10 países com maior capacidade cumulativa de geração de energia solar em 2016.	20
Tabela 3 – Comparação das propriedades do cobre versus alumínio	42
Tabela 4 – Comparação dos resultados de controle de temperatura e eficiência por meio de diferentes técnicas.	62

Lista de abreviaturas e siglas

°C	Graus Celsius
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PCM	Materiais de Mudança de Fase ("Phase Change Materials")
PV	Fotovoltaicos ("Photovoltaics")
PV-ST-PCM	Sistema integrado: fotovoltaico e heliotérmico
PV/T	Sistema integrado: fotovoltaico e heliotérmico
ST	Sistema Heliotérmico (Solar Thermal)

Sumário

1	A Energia Solar no Brasil e no Mundo	16
1.1	Contexto da demanda de energia global	16
1.2	História da energia solar	16
1.3	Situação atual do Brasil quanto a energias renováveis	17
1.4	Os objetivos do Trabalho	20
1.5	Materiais de mudança de fase (PCM).	21
1.5.1	Classificação dos PCMs	22
2	Contextualização das tecnologias de controle de temperatura de painéis solares	25
2.1	Introdução sobre o aumento de temperatura em PVs	25
2.2	Operação de uma célula solar: o efeito fotovoltaico	26
2.3	Métodos de regulação térmica dos painéis via movimento de fluidos	28
2.3.1	Abordagens passivas	29
2.3.2	Abordagens Ativas	32
3	O sistema integrado: painel solar e material de mudança de fase (PV-PCM)	37
3.1	Contextualização do tema	37
3.1.1	Por que PCMs	37
3.1.2	Sistema usual do PV-PCM	37
3.1.3	Resultados com PCMs	38
3.1.4	Dificuldades no comportamento térmico de PCMs	39
3.2	Material do contêiner	40
3.2.1	Materiais comuns: cobre versus alumínio	40
3.2.2	Material mais condutor versus menos condutor	42
3.3	Formato do contêiner	44
3.3.1	Presença de aletas	44
3.3.2	Estratificação da temperatura	46
3.3.3	Volume do contêiner (espessura do PCM)	48
3.4	Seleção de Materiais de Mudança de Fase	50
3.4.1	Propriedades desejáveis	50
3.4.2	Comparação entre principais PCMs usados	53
3.4.3	Maior condutância do PCM leva a um uma maior geração de energia	56
4	Integração com sistemas heliotérmicos (PV-ST-PCM, ou PV/T)	57
4.1	Sistema usual do PV-ST-PCM	57

5	Desafios	59
6	Resultados das técnicas apresentadas	61
6.1	Ativas	61
6.2	Passivas	61
6.3	PCMs	61
6.4	Síntese de resultados	61
7	Conclusão	63
	Referências	64

1 A Energia Solar no Brasil e no Mundo

1.1 Contexto da demanda de energia global

O uso de energia elétrica é essencial à humanidade já há décadas, sendo necessário tanto para produção de alimentos, controle de temperatura, quanto lazer, e para se realizarem inúmeros serviços (MA; YANG; LU, 2014). Com o aumento da tendência atual de cada vez mais se conectar e automatizar processos e serviços, também tem sido cada vez maior a quantidade de energia elétrica demandada pelas residências, indústrias e estabelecimentos ao redor do mundo. Ao mesmo tempo, recentemente, tem-se observado o crescimento pelo interesse em assuntos como aquecimento global, economia e falta de energia, aumento desmedido dos preços de combustíveis fósseis aliado à escassez iminente dos mesmos, o que tem encorajado o desenvolvimento e pesquisas ligadas a sustentabilidade e fontes de energias renováveis, tais como hidroelétrica, biomassa, geotérmica, solar e eólica, por exemplo (MA *et al.*, 2015).

Estima-se que mundialmente, a demanda de energia crescerá 36% entre 2008 e 2035, uma média de 1,2% ao ano (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013). Apesar da previsão de que globalmente o uso de petróleo ao final de 2035 ainda será a parcela mais significativa das opções de fontes de energia. O uso de fontes renováveis terá triplicado entre 2008 e 2035, dobrando sua participação na demanda total de energia de 7% para 14% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013).

1.2 História da energia solar

Desde o século 19 vem se estudando o potencial solar para geração de energia. Em 1839, o físico francês Edmond Becquerel observou o efeito fotovoltaico via um eletrodo em solução condutora exposta à luz, concluindo que era possível produzir energia a partir do sol (ZWEIBEL; HERSCH, 1984). Em 1916, Frank Shuman deu entrevista ao The NY Times sobre sua invenção: sistema de bombeamento de água para irrigação por meio da energia vinda do vapor gerado pela concentração de raios solares, a primeira estação de energia heliotérmica do mundo (THE NEW YORK TIMES, 02/07/1916). Em 1941, Russel Ohl patenteou as primeiras células solares, “light sensitive devices” (ZWEIBEL; HERSCH, 1984). Em 1954, o trabalho da americana Bell Telephones Laboratories produziu células fotovoltaicas de eficiência 4%, a qual logo evoluiu para 6% e então para 11%, viabilizando o começo de uma nova era de painéis solares (ZWEIBEL; HERSCH, 1984).

Mesmo com esses desenvolvimentos logo no começo do século, foi só na década de 70, como percebe-se pela figura 1 (GOOGLE NGRAM VIEWER, 2018), que termos como “energia solar”, “fotovoltaico”, e “energia renovável” tiveram picos

de interesses e publicações escritas em inglês, especialmente após 1973, quando houve a Primeira Crise do Petróleo. Com essa crise, os preços do barril de petróleo aumentaram 400% em cinco meses, tendência que só se manteve nos anos seguintes (BIBLIOTECA DIPLÔ, 01/05/2006). Acompanhando ainda mais de perto a tendência dos custos do barril de petróleo, levantou-se a questão da sustentabilidade, termo que hoje em dia tem estado cada vez mais na preocupação de governos e empresas.

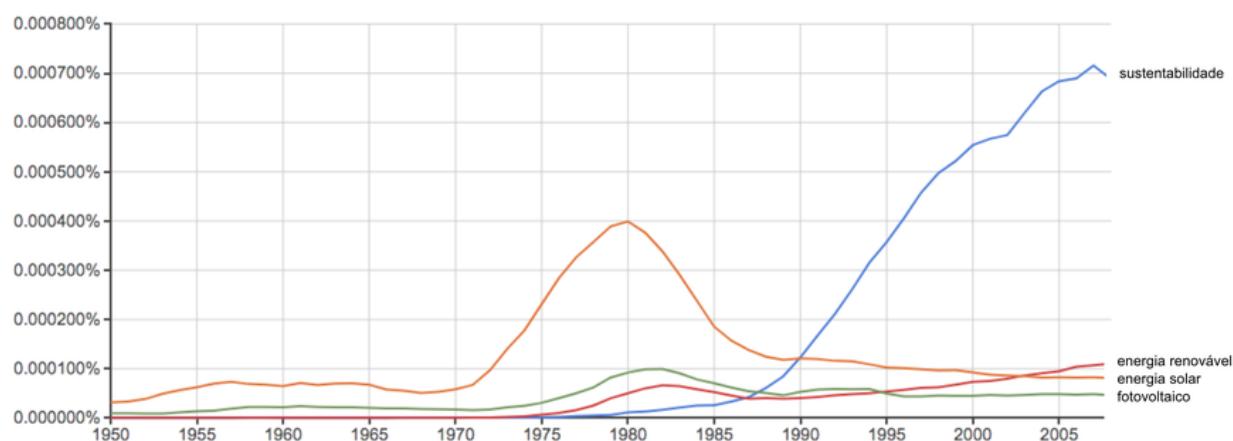


Figura 1 – Tendências de publicações escritas das palavras “energia solar”, “fotovoltaico”, “sustentabilidade” e “energia renovável”.

Fonte: adaptado de Google Books Ngram Viewer, 2018.

Em linhas gerais, desde que começaram as comercializações de painéis solares, os preços do watt gerado por um painel solar de silício cristalino vêm caindo de US\$76,67 por watt em 1977, a US\$10 em 1987 até US\$0,74 em 2013 (THE ECONOMIST, 21/11/2012), o que indica um futuro promissor para a viabilidade econômica das células solares.

1.3 Situação atual do Brasil quanto a energias renováveis

Hoje no Brasil, vê-se um cenário muito favorável às fontes renováveis de energia. Nossa geração de energia nacional a partir de não renováveis representou apenas 19,6% do total em 2016, quase apenas $\frac{3}{4}$ da parcela obtida em 2015, de 25,9% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2017). Na figura 2 observam-se as ofertas internas de eletricidade no Brasil em 2016. Fontes renováveis contabilizaram 81,7% da oferta interna de eletricidade no país, a qual soma a produção nacional às importações (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2017).

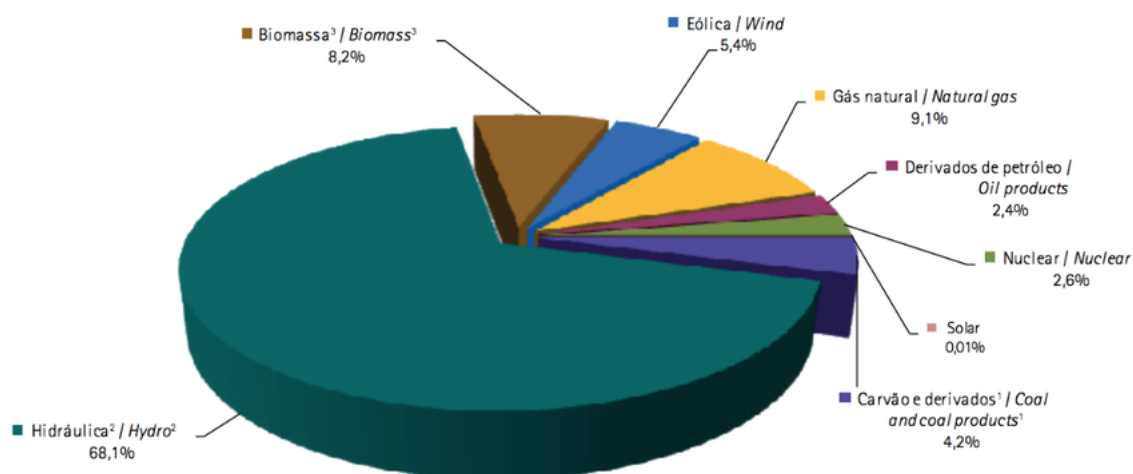


Figura 2 – Cenário brasileiro quanto a fontes de energia em 2016.

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2017.

Apesar do enorme potencial de geração de energia solar no Brasil, devido à posição geográfica e extensão territorial, observa-se que sua oferta frente às de outras fontes que fornecem energia é muito baixa: 0,01% da oferta interna em 2016. Países da Europa e Ásia exploram melhor seus potenciais, como pode-se observar nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Os 10 países com maior capacidade de geração de energia solar instalada em 2016.

1	China	34,5 GW
2	Estados Unidos	14,7 GW
3	Japão	8,6 GW
4	Índia	4 GW
5	Reino Unido	2 GW
6	Alemanha	1,5 GW
7	Coréia	0,9 GW
8	Austrália	0,8 GW
9	Filipinas	0,8 GW
10	Chile	0,7 GW

Fonte: adaptado de International Energy Agency, 2016.

Tabela 2 – Os 10 países com maior capacidade cumulativa de geração de energia solar em 2016.

1	China	78,1 GW
2	Japão	42,8 GW
3	Alemanha	41,2 GW
4	Estados Unidos	40,3 GW
5	Itália	19,3 GW
6	Reino Unido	11,6 GW
7	Índia	9 GW
8	França	7,1 GW
9	Austrália	5,9 GW
10	Espanha	5,5 GW

Fonte: adaptado de International Energy Agency, 2016.

Finalmente, em dezembro de 2017, a capacidade instalada no Brasil atingiu 1 GW (PV MAGAZINE, 09/01/2018).

1.4 Os objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo revisar as tecnologias de controle e aproveitamento do aumento de temperatura em painéis solares, bem como aprofundar e exemplificar com base na literatura os critérios de escolha de materiais que atuarão como materiais de mudança de fase, “PCMs”, e a melhor estratégia para escolha dos contêineres do PCM. Também visa esclarecer onde atualmente se encontram os maiores desafios para aplicação da tecnologia solar, principalmente do ponto de vista do controle do aumento temperatura durante a geração de energia a partir da incidência solar.

Primeiramente neste trabalho contextualizaram-se a situação da energia solar e o uso de materiais de mudança de fase; então contextualizaram-se as tecnologias de controle de temperatura dos painéis solares, explicando sobre abordagens ativas e passivas (as quais contém os PCMs); então explicou-se mais detalhadamente como funciona um sistema integrado entre um painel fotovoltaico e um material de mudança de fase, abordando-se seu contêiner, a seleção de materiais e resultados de melhorias sugeridas por outros trabalhos; foi explicado o funcionamento de um sistema integrado

entre PCM, fotovoltaico e heliotérmico; explicaram-se os desafios apontados e encontrados durante a pesquisa; sumarizaram-se os resultados das técnicas ativas, passivas e de PCMs; e por fim apresentou-se a conclusão baseada nos tópicos mencionados.

1.5 Materiais de mudança de fase (PCM).

Materiais de mudança de fase, ou “phase change materials” (PCM) são materiais que passam por transformação de fase sólido-líquido numa temperatura determinada por sua aplicação. Enquanto passam de sólido para líquido, eles absorvem energia dos arredores, mantendo a temperatura em um valor constante ou quase constante, como representado na figura 3 (FLEISCHER, 2015). A passagem de líquido para sólido tem comportamento semelhante, porém liberando a energia contida para os arredores. Fleischer (2015).

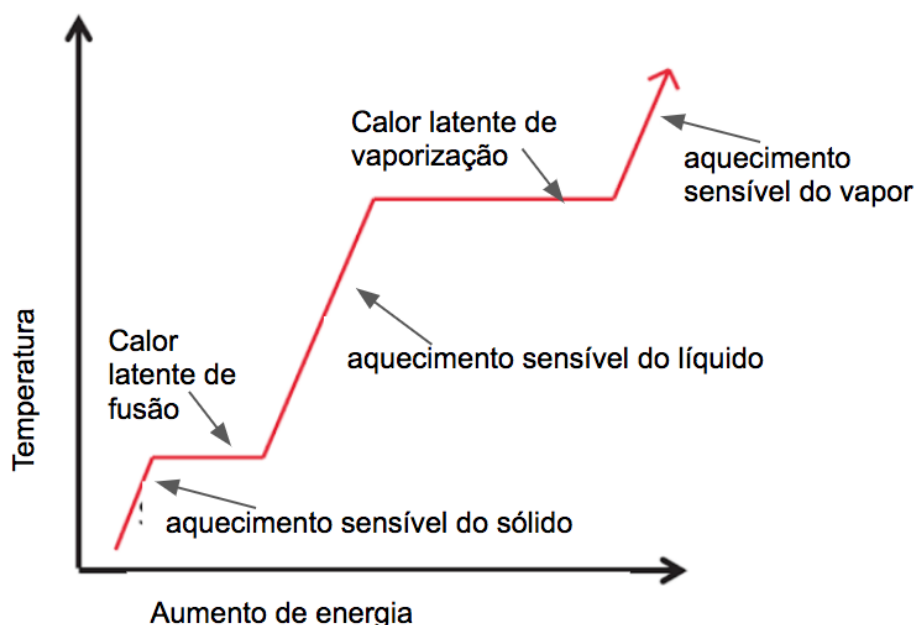


Figura 3 – Representação dos calores sensível e latente em um ciclo de aquecimento.

Fonte: adaptado de Fleischer (2015).

A energia absorvida pelo material aumenta a energia dos átomos e moléculas, levando-os a um estado mais vibracional. Na temperatura de fusão, as ligações entre átomos enfraquecem, e ocorre a mudança de fase para líquida, como representado na figura 4. Para passar à fase sólida, os átomos se reorganizam e passam a um estado de menor energia (FLEISCHER, 2015).

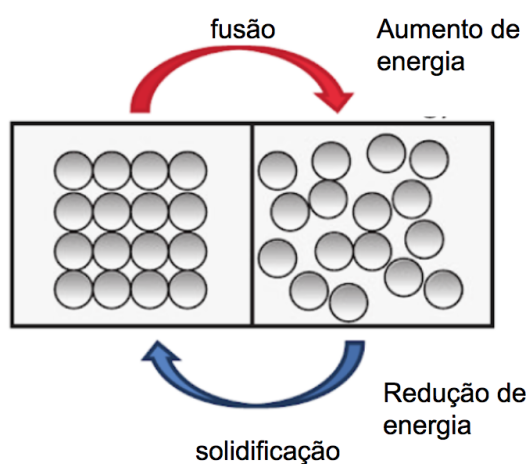


Figura 4 – Processo de fusão e solidificação.

Fonte: adaptado de Fleischer (2015).

Essa energia absorvida ou liberada durante a transição de fase é o calor latente, comumente descrito pelas unidades de J/g ou kJ/kg. O calor sensível é aquele em que não há mudança de fase.

1.5.1 Classificação dos PCMs

Os tipos de PCMs comumente usados podem ser classificados dependendo dos objetivos de cada autor. Iten e Liu (2014) classifica da maneira da figura 5: primeiramente pela mudança de fase escolhida, então por ser ou não orgânico, e por último por mistura ou eutético.

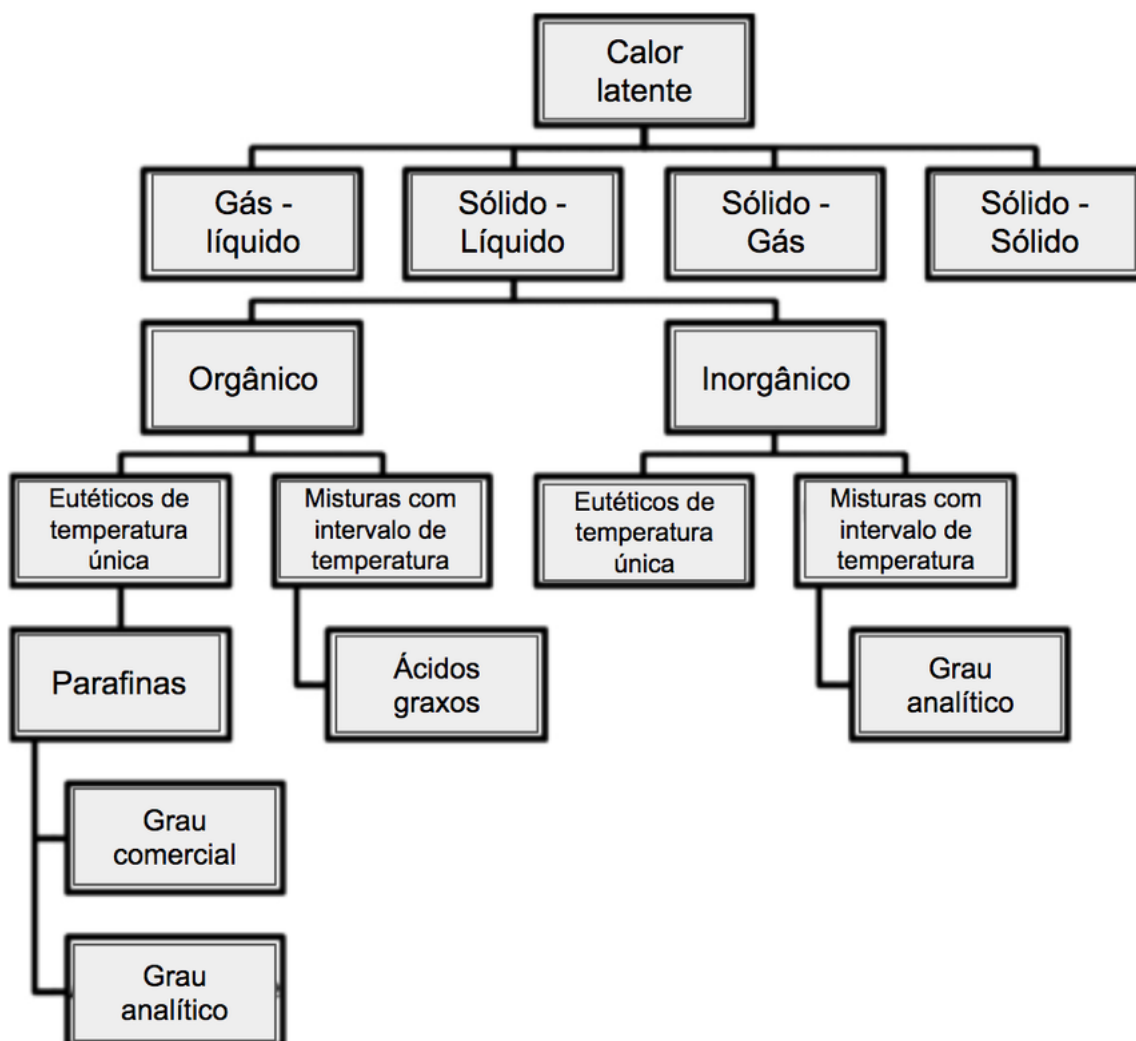


Figura 5 – Classificações dos tipos comuns de PCMs.

Fonte: adaptado de Iten e Liu, 2014.

As transformações de sólido-gás e líquido-gás são as que mais absorvem e liberam calor na transição, porém, também são as que apresentam variação volumétrica, o que não é desejável para esta aplicação por complicar o desenho do contêiner (ITEN; LIU, 2014). Os materiais de mudança de fase sólido-líquido apresentam boa capacidade de armazenamento de energia e menor variação de volume, sendo assim as escolhas mais comuns no ramo (ITEN; LIU, 2014).

Em termos simples, pode-se dividir os PCMs orgânicos em parafinas ou ácidos gordurosos (fatty acids), sendo os primeiros mais comuns para aplicações em construção e geralmente mencionados como ceras de parafina, as quais têm uma característica particular de que quanto mais cadeias de alcenos na composição, maior

a temperatura de mudança de fase (ITEN; LIU, 2014). São materiais muito caros, de forma que as parafinas comerciais consistem de uma mistura com hidrocarbonetos diferentes, os quais ainda permitem uma faixa de temperatura maior para ocorrer a mudança de fase (ITEN; LIU, 2014).

Tratando-se de inorgânicos, os sais hidratados são os mais comuns em construções, e são simples ligas de sais inorgânicos e água cuja mudança de fase consiste essencialmente na hidratação e desidratação (ITEN; LIU, 2014).

Por vezes é comum que se encontre uma terceira categoria além de orgânicos e inorgânicos: os eutéticos, os quais são uma mistura de múltiplos sólidos em proporções que em geral visam tornar o ponto de fusão tão baixo quanto possível. Há, porém, pouca informação sobre propriedades térmicas e físicas dos materiais (ITEN; LIU, 2014).

2 Contextualização das tecnologias de controle de temperatura de painéis solares

2.1 Introdução sobre o aumento de temperatura em PVs

Para que se obtenha a melhor eficiência possível da conversão de energia solar por painéis solares, três fatores devem ser levados em consideração. Primeiro, a intensidade do fluxo de radiação solar incidente sobre o painel, segundo, a qualidade do semicondutor utilizado na construção da placa fotovoltaica, e terceiro, a temperatura de funcionamento da célula (BIWOLE; ECLACHE; KUZNIK, 2011).

Este trabalho se concentra nos estudos sobre manter baixa a temperatura de operação do painel com o uso de materiais de mudança de fase, os PCMs, abordando principalmente suas propriedades e formatos de contêiner.

Em 1996, Huang, Eames e Norton (2004) testaram três módulos fotovoltaicos diferentes disponíveis no mercado na época para fazer análises em um simulador solar sobre a dependência da geração de eletricidade quanto à temperatura. Os três modelos diferiram entre si quanto à área do painel, à voltagem e à corrente do circuito da placa. Os resultados dos três testes são mostrados na figura 6.

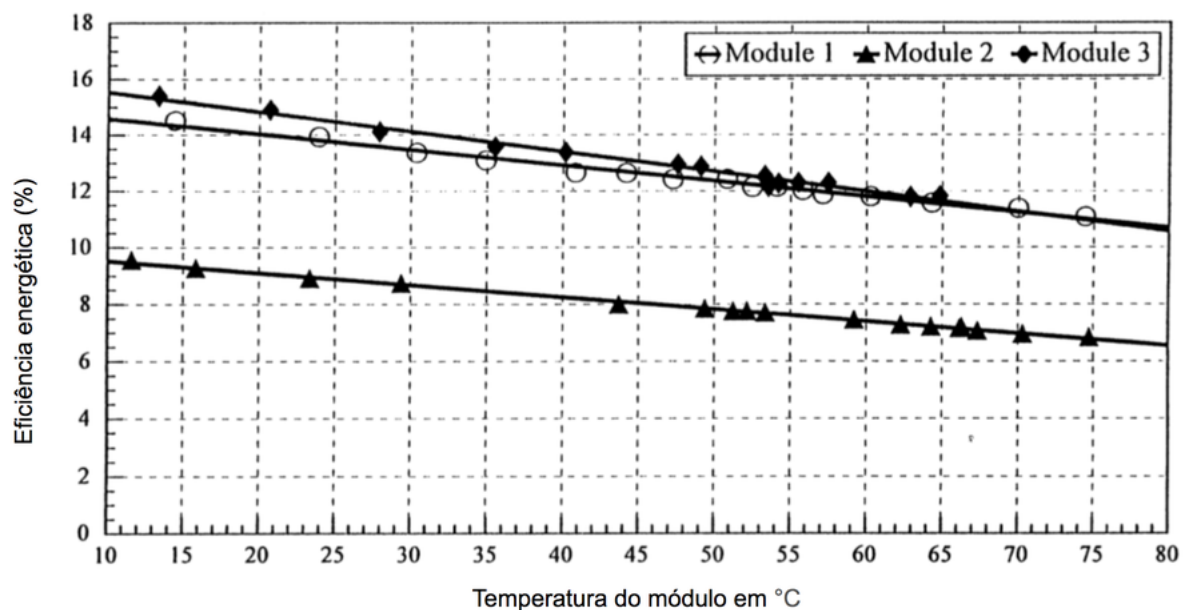


Figura 6 – Eficiências encontradas nos módulos testados versus a temperatura dos painéis em °C.

Fonte: adaptado de Huang, Eames e Norton, 2004.

Para os três tipos pode-se perceber que existe uma relação linear entre a eficiência da geração de energia e a temperatura do módulo. Nesse estudo, observou-se que para cada grau Kelvin acima da temperatura de operação, de 0,4 a 0,5% de

eficiência do módulo era perdido, enquanto outros estudos relatam perdas de 0,3 a 0,65%/K (MA *et al.*, 2015; BRINKWORTH *et al.*, 1997).

Para se obter uma aproximação da eficiência do módulo a uma dada temperatura, Skoplaki e Palyvos (2009) propuseram uma equação muito utilizada nesse campo, a equação (2.1), que relaciona a eficiência na temperatura em questão (η_T), a eficiência de referência do módulo (η_{ref} , em geral por volta de 12%), o coeficiente de eficiência-temperatura (β_{ref} , em geral 0,45%/K), e T_{ref} , que é a temperatura de referência, em geral 25 °C.

$$\eta_T = \eta_{ref}[1 - \beta_{ref}(T - T_{ref})] \quad (2.1)$$

2.2 Operação de uma célula solar: o efeito fotovoltaico

A operação de um painel solar se dá nas unidades menores, as células solares, e baseia no efeito fotovoltaico presente em semicondutores de silício junção P-N, que é a capacidade de converter fótons da luz do sol em eletricidade (MA *et al.*, 2015). Atualmente, comercialmente falando, os painéis apresentam eficiência de 14% até 22%, uma vez que grande parte da radiação solar incidente se dissipa como calor (MA *et al.*, 2015).

Por meio da dopagem, átomos de impureza inseridos na estrutura atômica do silício levam sua condutividade a aumentar, gerando semicondutores do tipo N e do tipo P. Para ocorrer dopagem, apenas um átomo dentro de milhões precisa ser diferente do silício (LUQUE; HEGEDUS, 2011; REINDERS; VERLINDEN; FREUNDLICH, 2016).

Os semicondutores tipo N são dopados com átomos contendo mais elétrons (carga mais negativa) que o silício quando inseridos no silício, inserem cargas negativas na estrutura, os quais não participam de ligações químicas e ficam livres para se mover (WELLER *et al.*, 2017).

Os semicondutores tipo P, da mesma forma, são dopados com átomos contendo mais cargas positivas (menos cargas negativas, “buracos” ou “lacunas”) não ligadas quimicamente, e são introduzidas no silício por átomos que contenham menos elétrons que o silício (WELLER *et al.*, 2017).

Energia da luz do sol incide no semicondutor de silício, em forma de fótons, os quais por carregarem energia, levam elétrons a se deslocar, o que cria um elétron móvel extra e um buraco móvel extra (BUBENZER; LUTHER, 2003).

Elétrons podem cruzar a junção P-N e ficam para trás cargas estáticas positivas. No outro lado do semicondutor, eles encontram os vazios e ambos desaparecem. Ao

mesmo tempo, pelo outro lado, vazios cruzam a junção e deixam para trás cargas estáticas negativas. Ao se juntar com elétrons no outro lado, ambos desaparecem (BUBENZER; LUTHER, 2003).

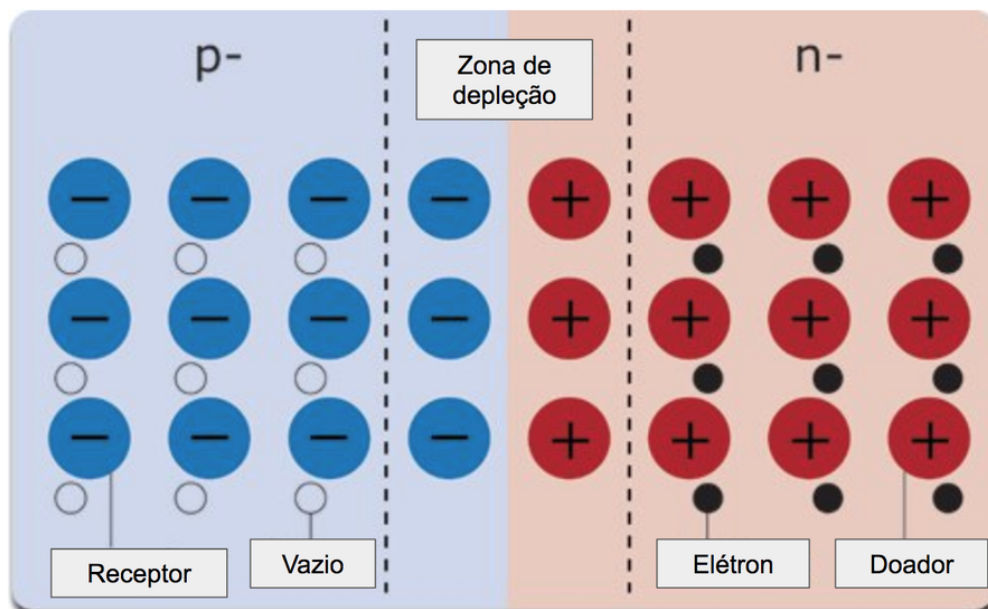


Figura 7 – Efeito fotovoltaico em um semicondutor de silício. Em azul, o semicondutor tipo P, e em vermelho o tipo N.

Fonte: adaptado de solarenergyfactsblog.com, 2018.

A zona ao redor da junção é a zona de depleção, onde não há mais portadores de carga. Porém, como houve separação das cargas estáticas, como visto na figura 8, um campo elétrico se forma nessa região, ou seja, neste caso há formação de corrente elétrica. (REINDERS; VERLINDEN; FREUNDLICH, 2016)



Figura 8 – Zona de depleção formando campo elétrico no semicondutor.

Fonte: adaptado de <http://www.science-kick.com/solar-cell-type/working-principle-of-junction-solar-cells>, 2017.

Conectando-se a célula solar a um circuito externo, permite-se que elétrons e buracos viagem que se recombinam na zona de depleção retornem o sistema à sua

condição inicial, e então conforme as cargas se movem, a corrente elétrica se forma e gera energia (REINDERS; VERLINDEN; FREUNDLICH, 2016).

2.3 Métodos de regulação térmica dos painéis via movimento de fluidos

Como abordado na seção anterior sobre o funcionamento das células solares, sabe-se que o calor absorvido pelo painel solar quando se incidem raios solares causa aumento da temperatura do módulo, o que além de levar a perdas de eficiência, pode danificar as células no longo prazo. Uma forma de contornar estes efeitos é, por meio de energia solar fotovoltaica integrada em edifícios, aproveitar o calor gerado e absorvê-lo para a construção na qual o painel solar está instalado, possibilitando seu uso para aquecimento interno ou da água por exemplo, mas por outro lado, por exemplo durante o verão, este tipo de abordagem aumentaria a demanda de sistemas de refrigeração do ambiente (MA *et al.*, 2015).

Outra maneira de aproveitar os efeitos de aumento de temperatura é utilizando-se sistemas híbridos fotovoltaico-térmico PV/T onde não só se aproveita a incidência de raios solares para, por meio do efeito fotovoltaico, se gerar energia elétrica, mas também se faz uso da energia térmica gerada, a qual é obtida a partir de componentes para extração de calor integrados em um único módulo (MA *et al.*, 2015).

As tecnologias e seus objetivos estão ilustradas na figura 9.

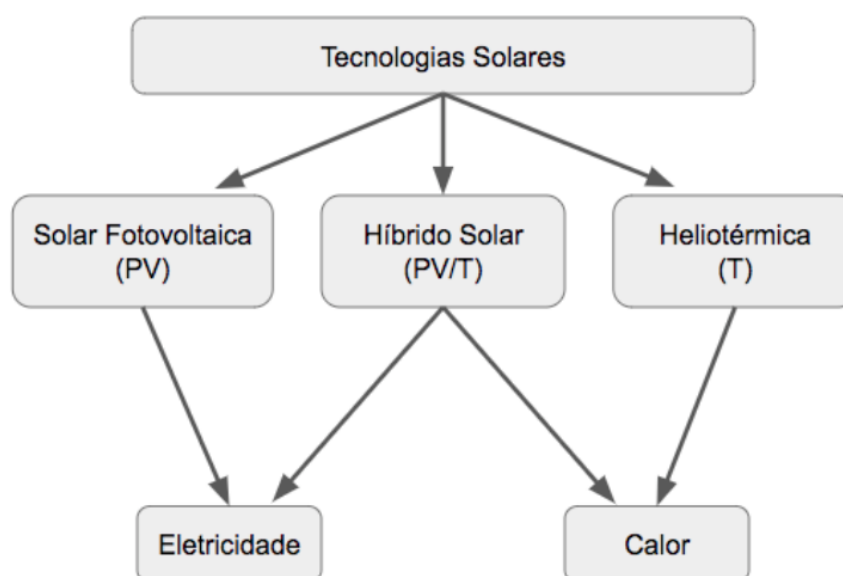


Figura 9 – Tenologias de aproveitamento de energia solar.

Podem-se utilizar também algumas técnicas mais simples e rápidas de refrigeração via fluidos para mitigar efeitos de aumento excessivo da temperatura do painel, as quais apenas visam dissipar o calor gerado. Ma *et al.* (2015) divide-os em dois tipos de abordagem: passivas e ativas.

2.3.1 Abordagens passivas

Segundo Sandberg (1999) abordagens passivas de controle de temperatura podem se basear nos seguintes métodos:

- 1) Convecção: quando há um espaço (duto ou canal de ar) pelo qual o ar pode fluir por trás do módulo. Nesse caso, a transferência de calor se dá por convecção do fluido levando calor para fora do painel.
- 2) Condução: quando corpos de temperatura mais baixas estão conectados ao módulo. Nesse caso, calor é transportado por condução para regiões onde houver tais corpos de menor temperatura.
- 3) Radiação: revestir a região traseira do módulo com material cuja emissividade é adequada para que calor seja transportado por radiação a regiões vizinhas de temperatura menor

Nesses casos, atrás dos painéis haverá canais, canos ou dutos por onde podem passar fluidos que serão responsáveis por remover o excesso de calor gerado (SANDBERG, 1999). Tratando-se de ar, o controle da temperatura ocorre por meio de circulação natural do ar, ou do efeito chaminé, que resulta do aquecimento do ar pela transferência do calor gerado de trás do painel (MA *et al.*, 2015). No caso de outros fluidos, acontece automaticamente pela circulação do fluido de trabalho, que ocorre também de forma passiva quando há aumento de temperatura localizada do fluido, causado pelo aquecimento do painel (MA *et al.*, 2015).

Yun, McEvoy e Steemers (2007) estudaram uma fachada teórica de um prédio cujo meio de controle da temperatura do módulo era ventilação natural, havendo preocupação com as diferenças de temperatura e comportamento térmico entre verão e inverno para que o sistema como um todo fosse contribuinte para o conforto térmico do prédio onde se instalaria. O comportamento geral de uma fachada de painéis solares pode ser encontrado na figura 10.

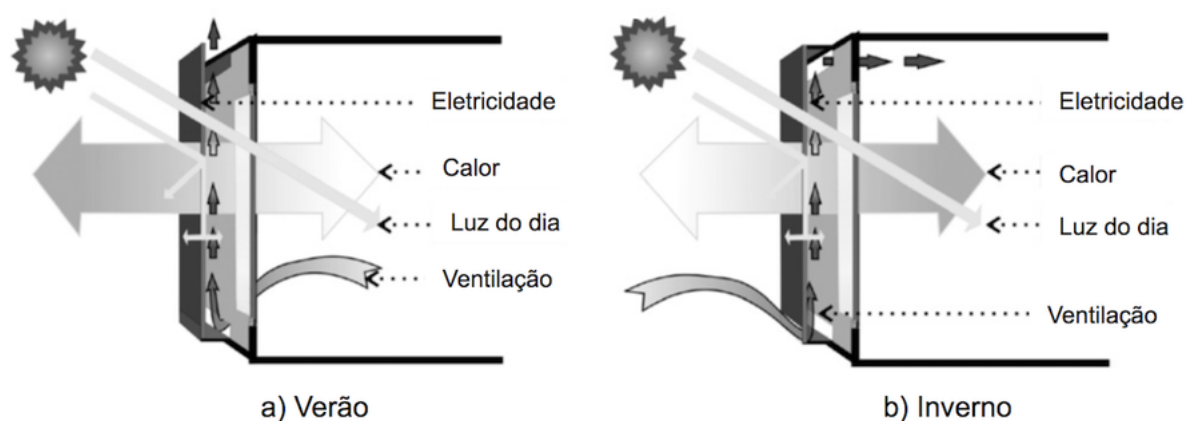


Figura 10 – Parâmetros de uma fachada ventilada durante a) verão, b) inverno.

Fonte: adaptado de Yuy, Mcevoy e Steemers, 2007.

À esquerda pode-se ver a representação do comportamento do painel durante o verão. A luz do sol é desejável para dentro do ambiente tanto no verão quanto no inverno por ser responsável por reduzir o consumo de eletricidade para iluminação. Já o calor tem comportamentos diferentes durante o inverno e verão: no verão é interessante que o calor se movimente para fora do prédio, enquanto no inverno pode-se contribuir para a redução da necessidade de se utilizar aquecedores. Este comportamento pode ser induzido por aberturas por onde passa ar: no verão, o ar quente sai do prédio e no inverno, o ar quente circula entre o painel e o prédio ou adentra a construção (YUN; MCEVOY; STEEMERS, 2007).

O desempenho obtido por Yun, McEvoy e Steemers (2007), como mostra a figura 11, o espaço para ventilação resultou em uma temperatura média 1 °C menor no mês de dezembro, e 5 °C mais baixa no mês de abril. Também percebe-se que sem ventilação, a maior temperatura a que o módulo chegou foi de 76,6 °C, versus 55,5 °C com ventilação, o que se traduz em uma melhora máxima de 15% na eficiência do módulo (i.e. 1.3% ponto percentual de ganho) (YUN; MCEVOY; STEEMERS, 2007).

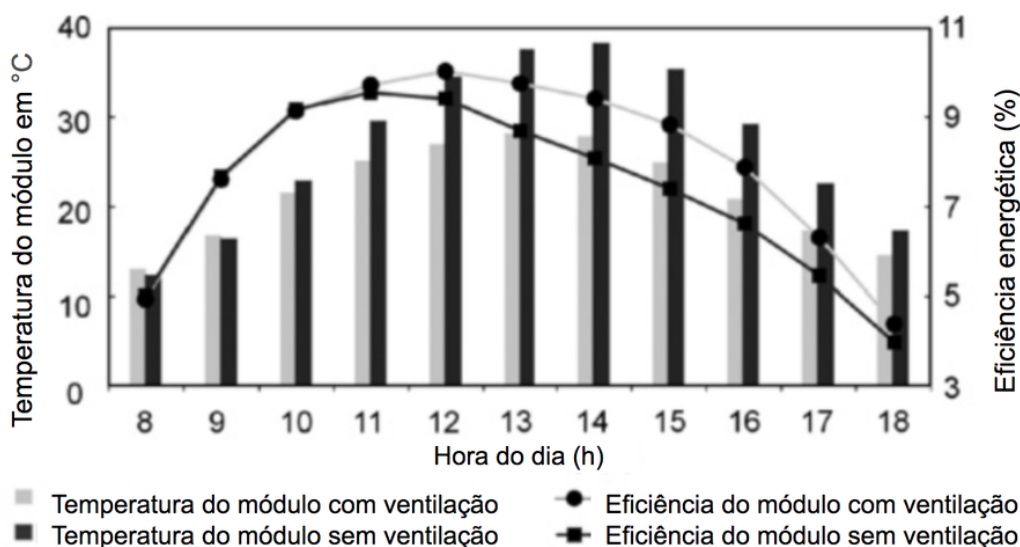


Figura 11 – Comportamento médio observado por hora do dia da temperatura e da eficiência dos módulos com (tom mais claro) e sem ventilação (mais escuro).

Fonte: adaptado de Yun, Mcevoy e Steemers, 2007.

De fato, por este trabalho conclui-se que o ganho anual de energia elétrica gerada não é alto, porém, em se tratando de um sistema simples de ser implementado, sem requisitos muito distantes dos de um projeto inicialmente sem a abertura de ventilação, é fortemente recomendado. Ainda, como a temperatura tem seu pico mais controlado, as chances de haver danos e até quebra do módulo por choque térmico são significativamente reduzidos, o que pode ocorrer uma vez que a temperatura da célula ultrapasse 85°C a 100°C (MARKVART; BOGUS, 1994).

Zhang *et al.* (2012) desenvolveu dois protótipos experimentais para avaliar os efeitos das abordagens passivas em sistemas PV/T via circulação natural de ar e circulação passiva de água em um sistema de canos por trás do painel. Para a circulação natural de ar, obteve-se uma melhora de 2,3% na eficiência elétrica, bem como uma redução média de 4,7°C, enquanto para o sistema de circulação de água, estes números foram 3% e 8°C (ZHANG *et al.*, 2012). É importante notar que para o caso de circulação natural de fluidos no estado líquido, é crítico garantir que o fluido não atingirá sua temperatura de solidificação, o que prejudicaria o sistema como um todo, especialmente naqueles em que deve haver remoção de calor das placas solares.

O uso de PCMs também é uma técnica passiva de controle de temperatura que foi discutida mais adiante.

2.3.2 Abordagens Ativas

As abordagens ativas de regulação térmica dos painéis solares envolvem o uso de bombas ou ventiladores para manter um fluxo de ar ou fluido, o qual pode passar pela frente ou por trás do painel (MA *et al.*, 2015). Em geral, essas formas de remoção de calor promovem melhores efeitos em comparação às abordagens passivas, porém, exigem mais manutenção, maiores gastos de implementação e corre-se o risco de a melhoria da eficiência do painel não compensar os gastos energético e financeiro para manter o sistema de dissipação de calor. Por outro lado, se for possível reaproveitar o calor gerado, ajudará nos custos (MA *et al.*, 2015).

Ji *et al.* (2008) propuseram um sistema integrado entre painel fotovoltaico e “bomba de calor via coletor solar” (tradução livre de photovoltaic solar assisted heat pump, PV-SAHP). O sistema é complexo, composto por vários itens tais como: evaporadores, compressor, condensadores, válvulas de expansão, filtros, dentre outros. O painel inicialmente apresentava eficiência elétrica de 10% e com a realização do experimento com PV-SAHP, atingiu-se uma eficiência média de 13,4%, um aumento de 34% na eficiência energética, portanto.

Krauter (2004) no Brasil apresentou um sistema em que um filme d’água sobre o painel garante o controle da temperatura do painel, bem como reduz os índices de reflexão da irradiação solar, reduz preocupações com limpeza de poeira acumulada sobre o módulo e ainda se mostra esteticamente mais agradável que o painel comum. O estudo obteve uma temperatura média durante o dia que chegou a ser 22 °C menor que um módulo convencional, como mostra a figura 12, ficando em média apenas 5 °C acima da temperatura ambiente.

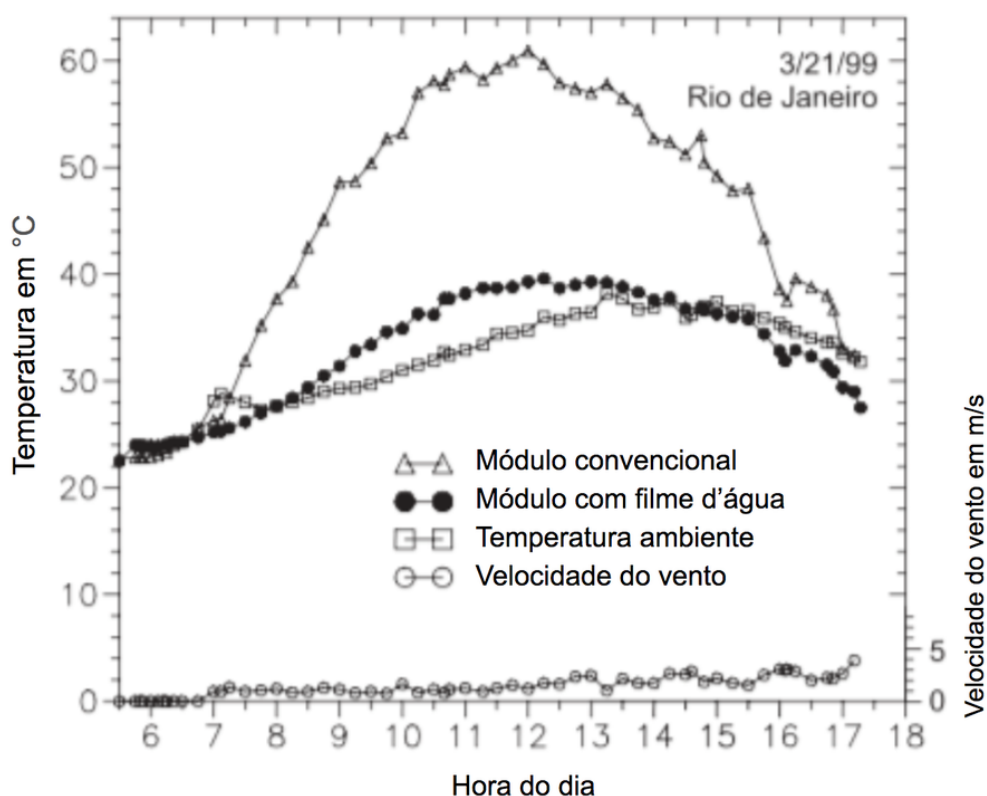


Figura 12 – Comparação das temperaturas com o filme d'água e sem.

Fonte: adaptado de Krauter, 2004.

O ganho em eficiência foi por volta de 10%, como visto na figura 13. Krauter (2004) conclui que o ganho energético não compensou a energia requerida para a bomba d'água. O estudo aponta que a bomba usada teria eficiência muito baixa, o que poderia ser ajustado usando-se uma bomba de melhor qualidade. Deve-se atentar aqui ao tempo que a melhora na eficiência levaria para se pagar no caso da substituição de componente.

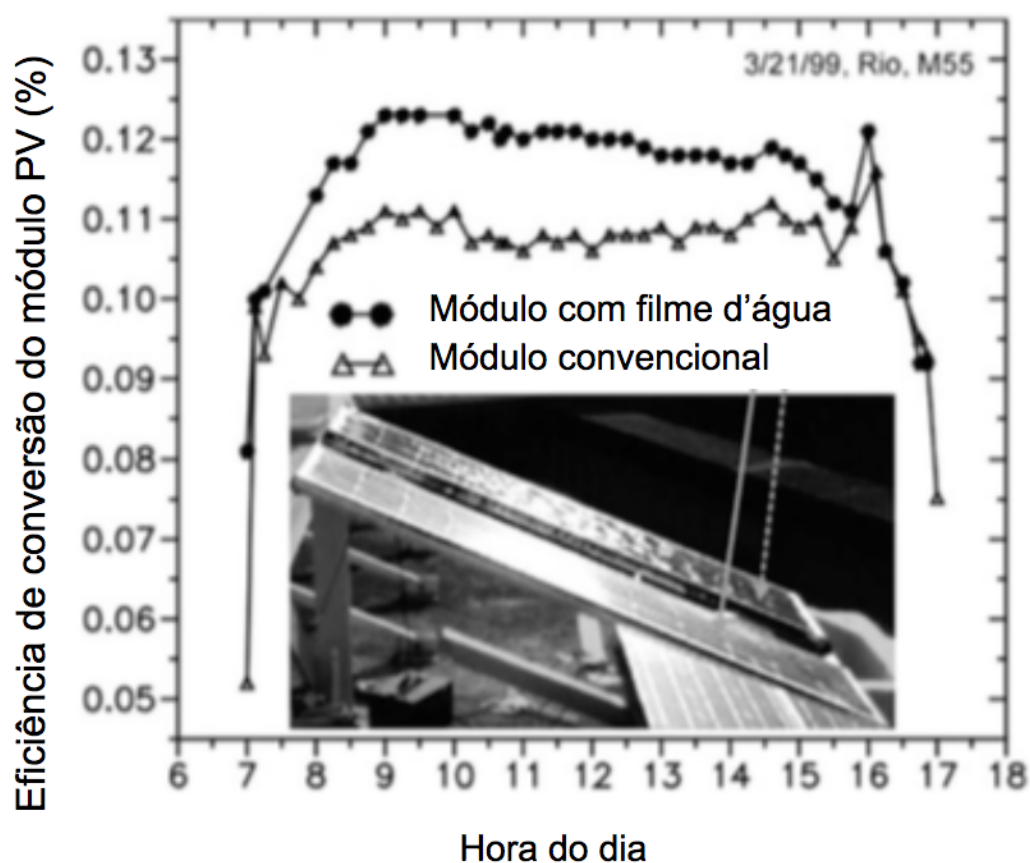


Figura 13 – Comparação das eficiências de conversão de energia com o filme d'água e sem.

Fonte: adaptado de Krauter, 2004.

Para Wilson (2009), seus estudos mostraram um arranjo sem uso de bombas, apenas usando a gravidade para circular água pelo painel a partir de um tanque, como visto na figura 14. A água não circula pelo painel de volta ao tanque. Isto representa dificuldade de implementação do modelo, uma vez que o desperdício de água é uma preocupação real. Em casos de integração do módulo com prédios, a água de reuso seria uma saída interessante.

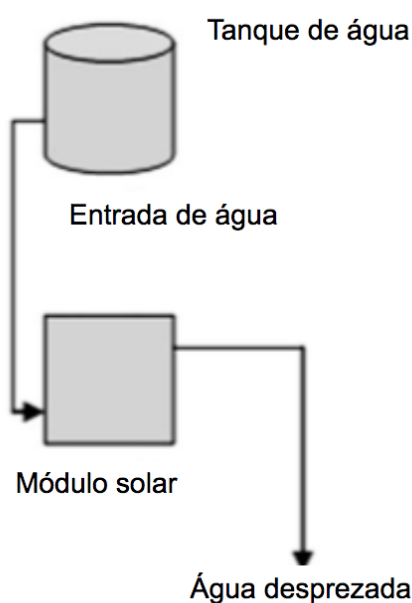


Figura 14 – Arranjo proposto por Earle (2009).

Fonte: adaptado de Earle, 2009.

Seus resultados mostraram que houve uma melhora de 12,8% na eficiência de conversão elétrica do painel, e o controle da temperatura levou seus valores de 62 °C a 30 °C em um curto período de tempo. Também observou-se que a taxa de fluxo da água sobre o painel influenciava o controle de temperatura: quanto maior o fluxo, mais rápido conseguia-se a redução da temperatura desejada (WILSON, 2009).

Estudos de Tonui e Tripanagnostopoulos (2007) comparando os desempenhos de fluxos natural e forçado de ar, resultaram nas figuras 15 e 16, que mostram as temperaturas T_{pv} , temperatura do PV, T_w é a temperatura da parede do prédio onde está integrado o módulo, e T_{out} representa a temperatura de saída do ar ao passar pelo módulo. Pode-se observar que, apesar de as temperaturas dos arredores do PV serem mais contidas, se tratando da temperatura do PV, pouca diferença realmente aparece quando tem-se circulação natural e forçada de ar (TONUI; TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2007). Por outro lado, o controle da temperatura via circulação natural do ar acaba sendo muito limitado ao fluxo natural de ar, sendo que o fluxo forçado então acaba sendo mais confiável (MA *et al.*, 2015).

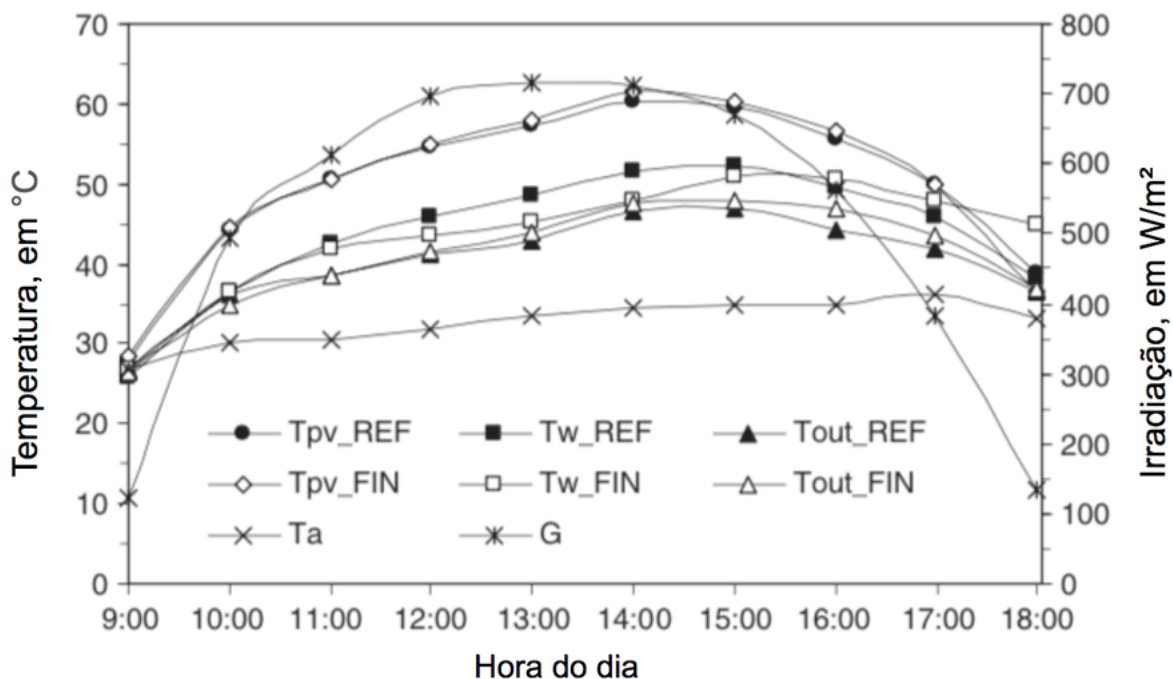


Figura 15 – Perfis horários de temperatura para o fluxo natural de ar para dois tipos de sistemas PV. Aqui _REF se refere ao sistema de referência e _FIN ao sistema com aletas.

Fonte: adaptado de Tonui e Tripanagnostopoulos, 2007.

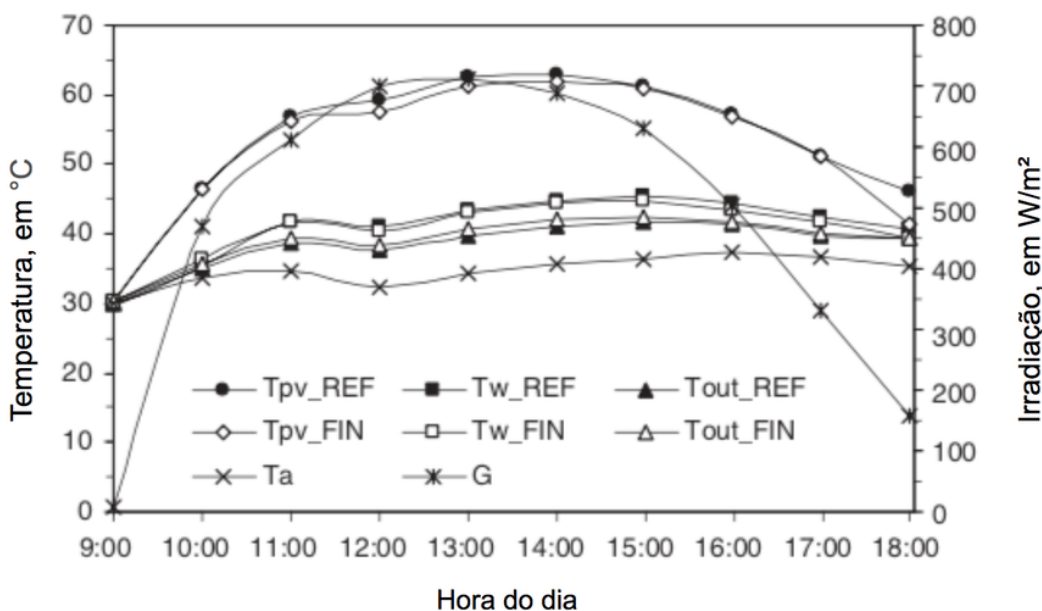


Figura 16 – Perfis horários de temperatura para o fluxo forçado de ar para dois tipos de sistemas PV. Aqui _REF se refere ao sistema de referência e _FIN ao sistema com aletas.

Fonte: adaptado de Tonui e Tripanagnostopoulos, 2007.

3 O sistema integrado: painel solar e material de mudança de fase (PV-PCM)

3.1 Contextualização do tema

3.1.1 Por que PCMs

PCMs são materiais de mudança de fase que são capazes de absorver grandes quantias de energia em temperaturas constantes durante suas transformações de fase, sendo classificados como materiais de armazenamento de calor latente (latent heat storage units, LHS) (SAIKRISHNAN; KARTHIKEYAN, 2016; HUANG *et al.*, 2008).

Atualmente, aplicações de PCMs envolvem desde sistemas de armazenamento de energia, resfriamento de alimentos e bebidas, controle de temperatura de ambientes onde há muitos aparelhos eletrônicos, conforto térmico em veículos, e sistemas térmicos em espaçonaves (KENISARIN; MAHKAMOV, 2007).

A aplicação em células solares se mostra promissora porque não só o sistema formado apresenta bons resultados de comportamento térmico e desempenho elétrico como o potencial de aproveitamento da energia térmica de baixo custo armazenada pelo PCM tem várias possibilidades de uso.

3.1.2 Sistema usual do PV-PCM

O sistema formado por PV-PCM é uma promissora tecnologia híbrida que integra um PCM nos módulos para que ao final a eficiência de conversão seja mais alta. Este sistema absorverá o calor latente durante a fase sólido-líquido do PCM numa certa faixa de temperatura, e caso haja meios de extração de calor apropriados, pode-se inclusive aproveitar a energia térmica armazenada pelo PCM a um baixo custo (MA *et al.*, 2015).

A configuração usual do sistema PV-PCM apresentado por Huang, Eames e Norton (2000) pode ser observada na figura 17. Em um contêiner fica o PCM, e a célula fotovoltaica se anexa à parte frontal dele, ficando entre o contêiner e a incidência de raios solares. Ambas as partes dianteira e traseira são feitas de metal (no caso, alumínio) para garantir boa condutividade. Nas partes de baixo e de cima do contêiner, quer-se obter superfícies adiabáticas, e no caso utilizou-se poliestireno.

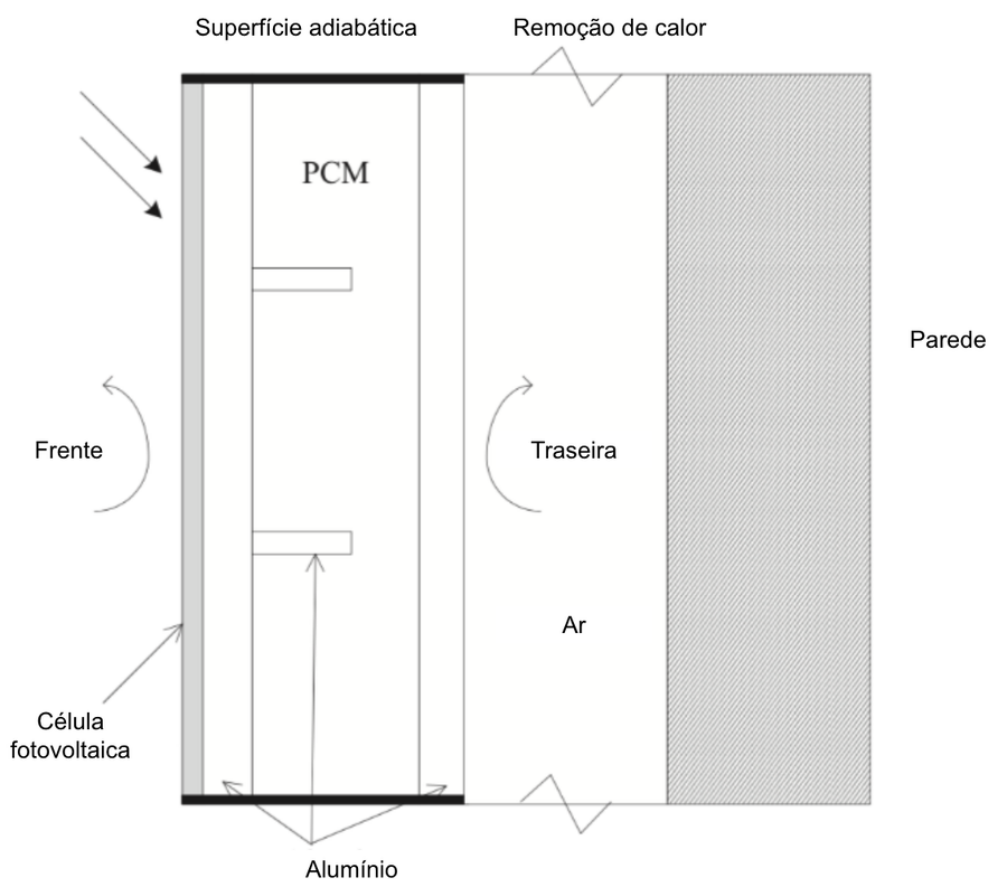


Figura 17 – Desenho comum de um painel integrado a um PCM.

Fonte: adaptado de Ma, T. et al, 2015.

Quando os raios de sol incidem na célula fotovoltaica, parte se converte para eletricidade e parte gera calor, o qual é levado por condução pelas paredes do contêiner até o PCM. Parte do calor será dissipada por convecção natural na abertura entre o contêiner e o prédio por onde circula ar, o que tanto melhora a eficiência energética do sistema como ajuda a evitar que as células se superaqueçam e danifiquem.

3.1.3 Resultados com PCMs

Smith, Forster e Crook (2014) conduziram durante um ano um estudo em 5 regiões diferentes do mundo comparando resultados de um PV versus os de um PV-PCM. Para uma região do hemisfério norte em julho, obtiveram-se os resultados da figura 18, na qual a linha tracejada em a) indica a temperatura de fusão do PCM: 23°C. Vê-se que as maiores diferenças encontradas residem em horários de sol intenso, próximas ao meio dia e que a temperatura do painel fica muito mais próxima daquela do ambiente quando se usam PCMs como forma de controle.

Obteve-se neste estudo uma melhora na eficiência de geração de energia de até 6,8%, com redução de temperatura de até 19°C em determinadas regiões e horas do dia (SMITH; FORSTER; CROOK, 2014).

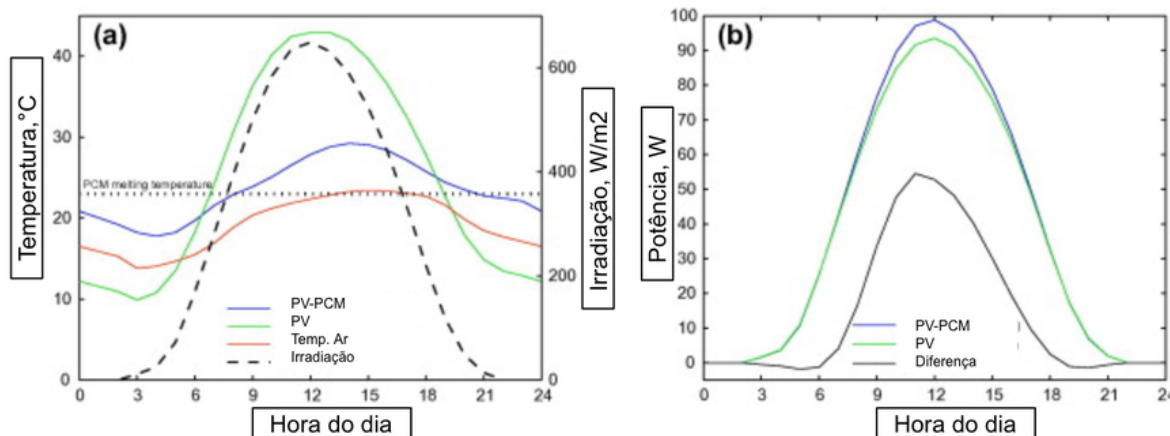


Figura 18 – Resultados obtidos de a) temperatura e b) potência no sistema com e sem PCM por hora do dia.

Fonte: adaptado de Christopher J. Smith et al., 2014.

Os resultados dos estudos de Huang, Eames e Norton (2006) mostram que, em comparação com um sistema sem um PCM integrado, a eficiência chegou a melhorar 7,5% devido a uma diferença de temperatura obtida de 17°C.

3.1.4 Dificuldades no comportamento térmico de PCMs

A maior barreira técnica imposta ao uso de PCMs para armazenamento de energia é sua baixa condutividade térmica (HUANG *et al.*, 2008). Se não houver boa condutividade térmica, apenas uma fração do PCM será capaz de controlar a temperatura do painel, de forma que menor quantidade de energia térmica poderá ser absorvida no sistema.

Ainda, é importante que o sistema PV-PCM seja capaz de dissipar o calor gerado no painel com velocidade ao mesmo tempo que seu ponto de fusão esteja abaixo da temperatura máxima a que se quer que os painéis solares cheguem (MA *et al.*, 2015). Uma compreensão mais detalhada dos processos térmicos ocorrendo dentro do PCM é fundamental para se aprimorar o desenho do sistema (HUANG *et al.*, 2008).

Huang, Eames e Norton (2000) apontam o comportamento de fusão do PCM dependente de quatro fatores:

- Intensidade da insolação,
- Duração da insolação,
- Geometria do contêiner do PCM,
- Seleção do PCM em si.

Quanto à insolação, pouco pode-se fazer para melhorar, pois há dependência da localização geográfica, do ângulo da incidência solar, da temperatura ambiente e do clima onde se quer instalar os módulos (AL-ROUSAN; ISA; DESA, 2018). Atualmente, há sistemas de rastreamento de posição solar, os quais detectam a melhor orientação para o painel durante o dia e alteram a inclinação e rotação dos mesmos para otimizar a produção de energia (AL-ROUSAN; ISA; DESA, 2018). O grande desafio da tecnologia hoje é sua viabilidade econômica e que a demanda de energia para fazer este posicionamento do sistema seja menor do que o ganho.

Alguns parâmetros são importantes de se levar em consideração ao escolher a estrutura do PV-PCM:

- 1) Material do contêiner
- 2) Forma do container: presença de aletas, volume do contêiner, geometria do contêiner.
- 3) Escolha do PCM: propriedades necessárias, tipo de material de mudança de fase, uso de mais de um material no sistema

3.2 Material do contêiner

3.2.1 Materiais comuns: cobre versus alumínio

Em geral, como descrito por Huang, Eames e Norton (2000), é ideal que as superfícies de cima e de baixo do contêiner sejam adiabáticas, restando ainda a dúvida

sobre as vantagens e desvantagens de se utilizar um material mais ou menos condutor no resto do contêiner.

Huang, Eames e Norton (2000) realizaram simulações para avaliar o uso de cobre versus de alumínio (sendo o alumínio o material mais utilizado para contêiner de PCMs nos estudos levantados aqui) para construção do container, que indicam que ambos possuem um efeito semelhante na condução de calor, o que resulta que alumínio foi escolhido como uma opção mais adequada, considerando-se o custo-benefício dos materiais.

Esses testes foram conduzidos considerando-se a temperatura inicial de 20°C, tanto para o PCM quanto para o ambiente, e os coeficientes de transferência de calor nas partes dianteira e traseira do contêiner foram, respectivamente, 10 W/m²K e 5 W/m²K, enquanto as partes de cima e de baixo eram adiabáticas. O ponto de fusão usado para o PCM foi de 32°C e a intensidade de insolação 1000 W/m².

Avaliando-se o desempenho do cobre versus do alumínio, percebeu-se que tanto a temperatura média quanto o tempo até a fusão completa tiveram valores muito parecidos para os dois materiais, tabela 3. O comportamento durante o tempo pode ser observado na figura 19. Nota-se que os dois desempenhos são muito semelhantes, apesar do cobre manter a temperatura média um pouco mais baixa demorar um pouco a mais para total fusão. Pela tabela da London Metal Exchange, consultada em 8 de maio de 2018, o valor do cobre é 2,8x mais caro que o alumínio, tornando a escolha de materiais simples (LONDON METAL EXCHANGE (LME),).

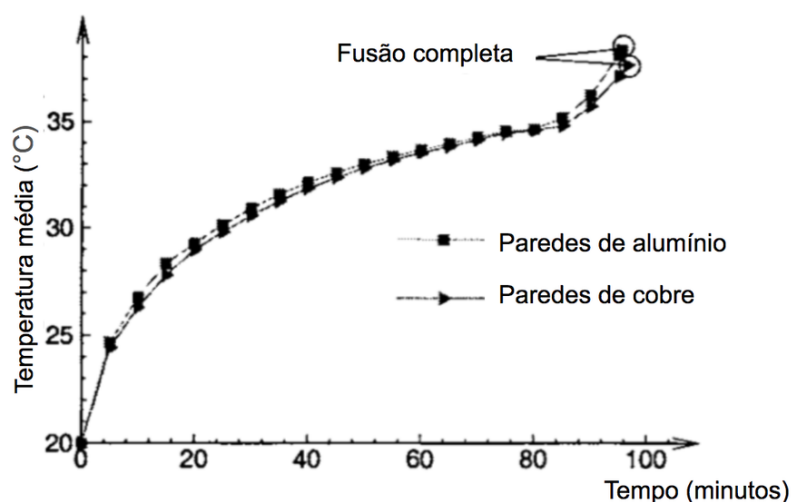


Figura 19 – Comparação da temperatura média por tempo para paredes de alumínio e de cobre.

Fonte: adaptado de M.J. Huang et al, 2000.

Tabela 3 – Comparação das propriedades do cobre versus alumínio

	Modelo 1: Alumínio	Modelo 2: Cobre
Minutos até fusão total	95,6	96,5
Temperatura média (°C)	38,3	37,6

Fonte: adaptado de M.J. Huang et al, 2000.

3.2.2 Material mais condutor versus menos condutor

Hasan *et al.* (2009) fabricaram quatro contêineres e avaliaram a influência de se usar um material de menor condutividade, o Perspex (nome comercial dado ao polimetil-metacrilato (PMMA)), ao de um com maior condutividade, o alumínio, e também avaliou-se a influência de se ter uma espessura de 3 cm ou 5 cm entre o módulo PV e o container, conforme ilustra a figura 20.

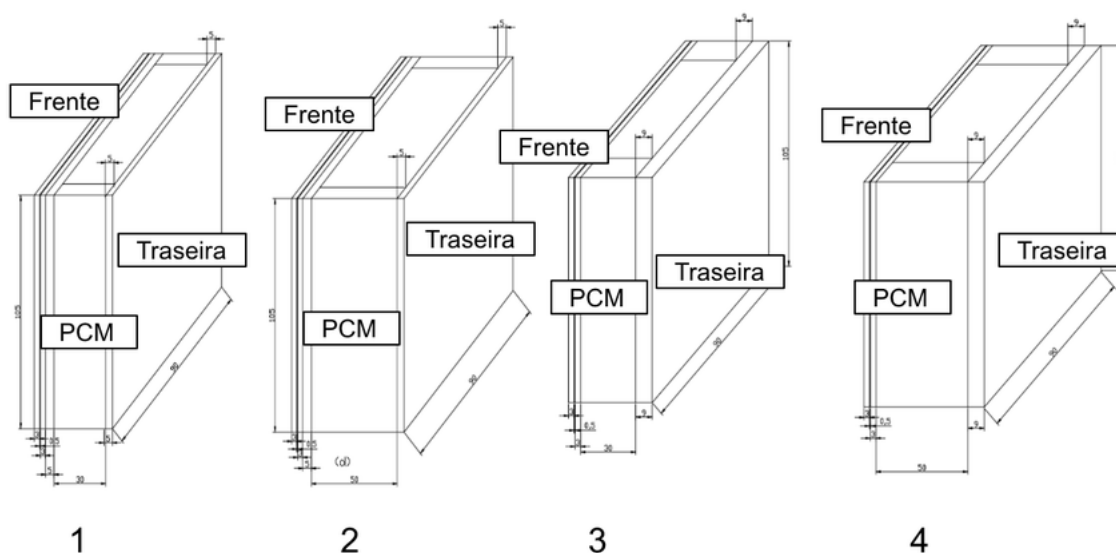


Figura 20 – Os quatro sistemas PV-PCM variando espessura do PCM e condutividade do contêiner.

Fonte: adaptado de Hasan et al., 2009.

Os quatro sistemas PV/PCM foram elaborados da seguinte maneira:

- 1) Perspex de baixa condutividade, com $3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$
- 2) Perspex de baixa condutividade, com $5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$
- 3) Alumínio de alta condutividade, com $3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$
- 4) Alumínio de alta condutividade, com $5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$

Para cada tipo de contêiner, testes foram conduzidos com 5 PCMs diferentes: cera de parafina RT 20 (RT20), sais dos hidratos SP22 e CaCl_2 , eutéticos de ácido capríco-laurico (CL) e ácido cáprico-palmítico (CP). O experimento ocorreu em três níveis de insolação desde 500, 750 até 1000 W/m^2 .

As figuras 21 e 29 indicam na ordenada a diferença de temperatura entre o teste em questão e um teste de referência, o qual foi realizado irradiando-se um painel solar em um simulador em insolação 500 W/m^2 .

Pode-se perceber que a área da curva aumenta para os contêineres de material mais condutor, figura 29, versus o menos condutor, figura 21, o que indica melhor capacidade de controle da temperatura no sistema mais condutor.

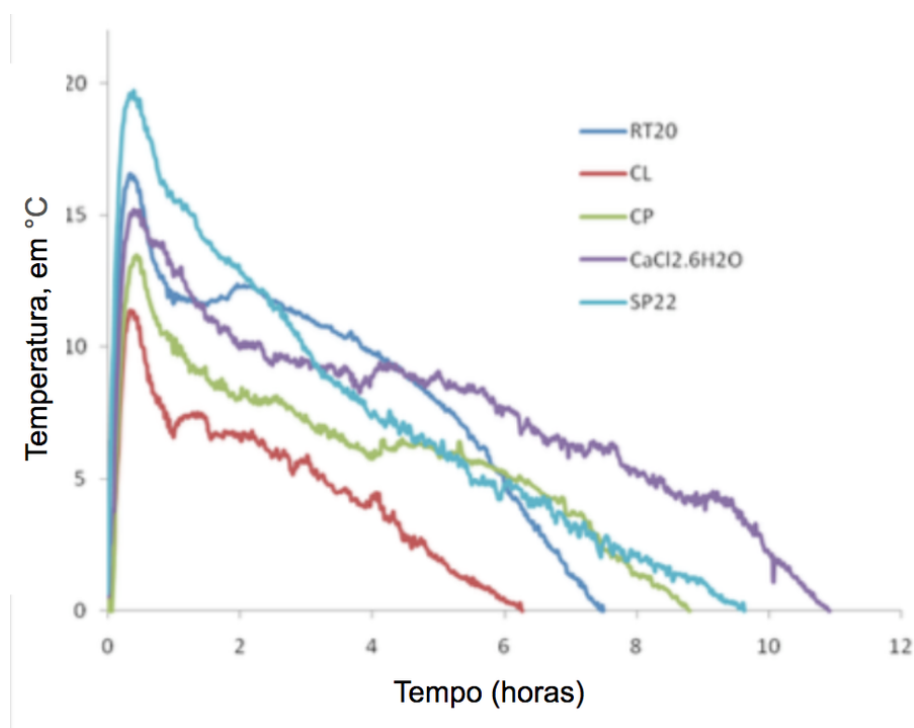


Figura 21 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de Perspex.

Fonte: adaptado de Hasan et al., 2009.

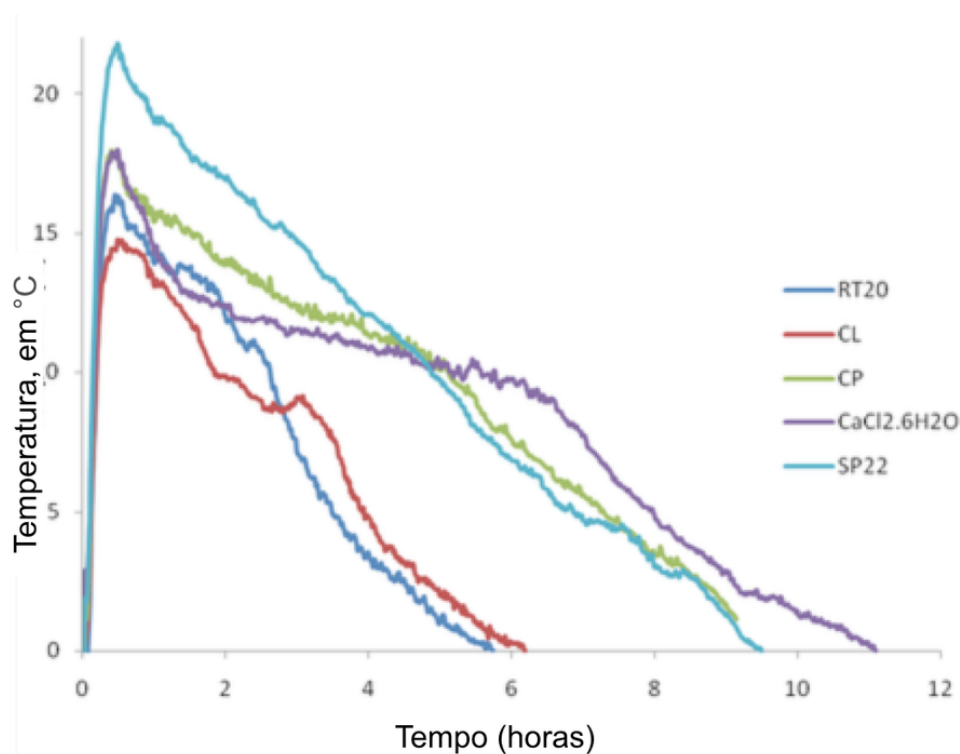


Figura 22 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de alumínio.

Fonte: adaptado de Hasan et al., 2009.

Deve ser observado que uma desvantagem do Perspex é que não pode ser soldado como o alumínio, resultando que após alguns ciclos de fusão ele apresenta degradação da cola que une as placas, levando a vazamentos do PCM (HASAN *et al.*, 2009).

3.3 Formato do contêiner

3.3.1 Presença de aletas

De acordo com Huang, Eames e Norton (2000), onde a importância da existência de aletas quanto aos resultados de tempo até fusão completa e temperatura média do sistema, foram avaliados que o principal efeito das aletas era de distribuição de temperatura no PCM, independente das espessuras usadas (BRINKWORTH; MARSHALL; IBARAHIM, 2000).

Conforme a insolação incidente vai causando que o PCM mais próximo da parede metálica vá se fundindo, com o tempo essa camada que se iniciou fina e mais

para cima no contêiner foi se aprofundando no material, para a direita e para baixo.

Já Huang *et al.* (2011) observaram que além de conseguir uma queda na temperatura da superfície frontal do PV, o efeito da presença de aletas também foi responsável por aumentar mais rápido a temperatura. Um efeito promovido pelas aletas foi que quando se reduz os espaços entre elas, menos tempo se leva para ocorrer fusão, devido ao processo de fusão ocorrer muito mais por condução do que por convecção natural.

Por outro lado, a presença de aletas permite que bolhas se formem, e seu posicionamento próximo das aletas pode levar a aumentar a resistência à transferência de calor do PCM (HUANG *et al.*, 2011) .

Huang *et al.* (2011) relacionaram, portanto, que quanto mais aletas houver no contêiner, menor será o número de Rayleigh observado, e melhores serão a distribuição e o controle de temperatura durante o aquecimento do PV, como mostram as figuras 23 e 24.

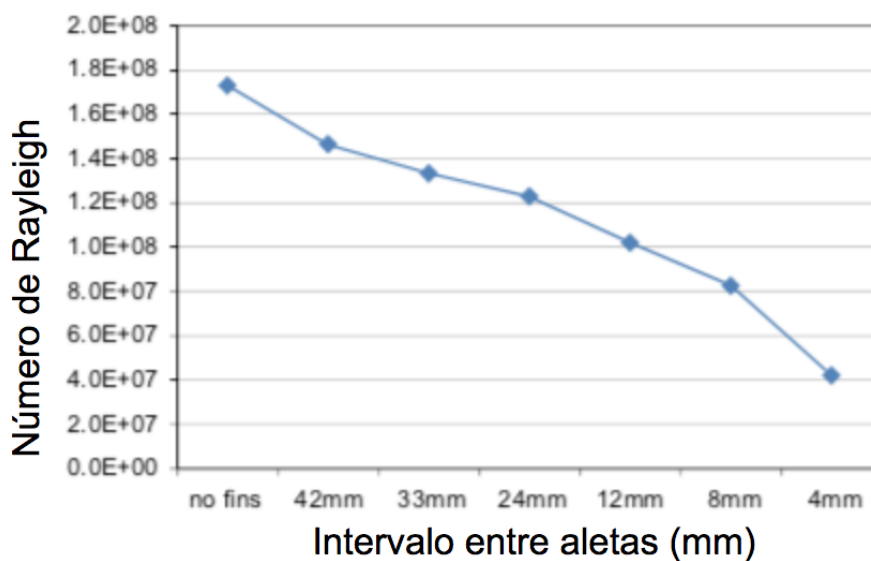


Figura 23 – Comportamento do número de Rayleigh reduz quanto menor o intervalo entre aletas no sistema.

Fonte: adaptado de Huang et al., 2011.

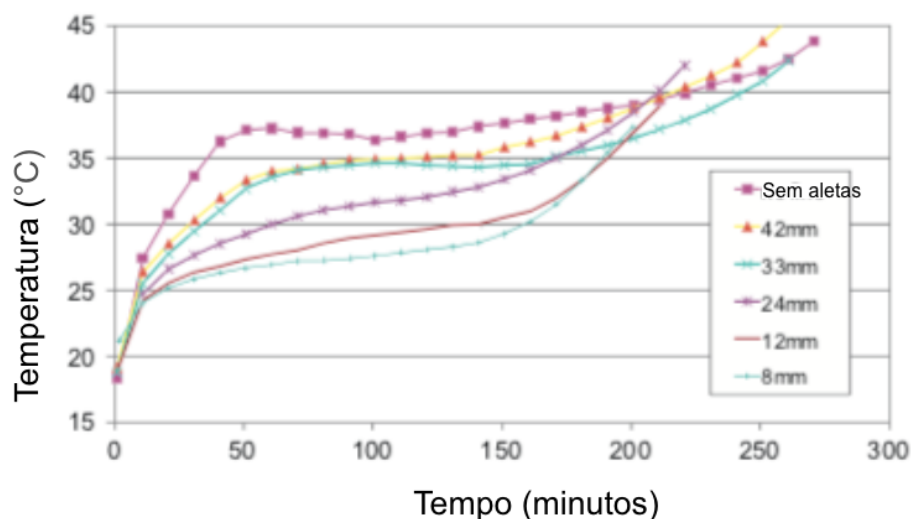


Figura 24 – Comportamento da temperatura por tempo versus o número de aletas no sistema.

Fonte: adaptado de Huang et al., 2011.

3.3.2 Estratificação da temperatura

Huang *et al.* (2011), Huang *et al.* (2008) observaram também que a fusão ocorre de cima para baixo dentro do contêiner, e da forma, a estratificação da temperatura se faz muito mais presente dentro do mesmo quando não há aletas no material, que pode ser verificado pelas figuras 26 e 27. A má condução de calor dos PCMs explica esse efeito, mas é importante que ele seja controlado para que o PCM seja capaz de regular a temperatura como um corpo todo, e não apenas nas partes em que a transmissão de calor ocorrer da forma planejada. Na figura 25 podem-se visualizar os pontos de medição da temperatura e fica evidente na figura 26 a estratificação da temperatura.

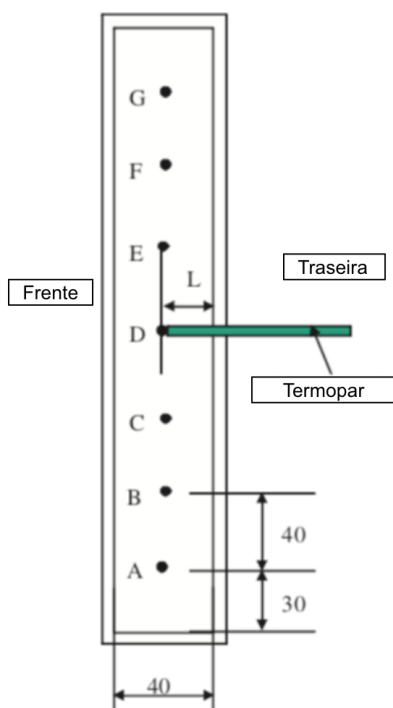


Figura 25 – Esquema dos pontos de medição da temperatura.

Fonte: adaptado de Huang et al., 2008 e 2001.

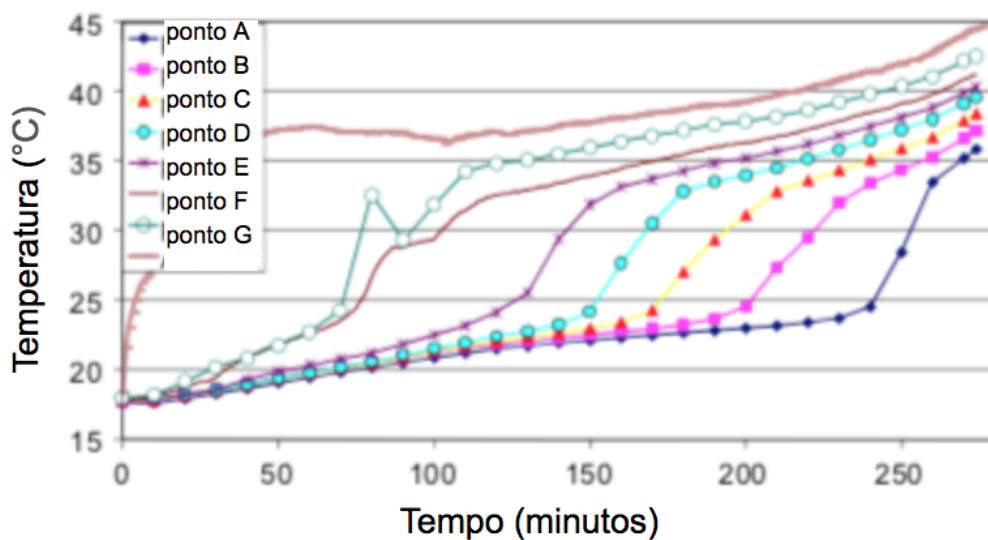


Figura 26 – Resultados de temperatura por tempo no sistema sem aletas.

Fonte: adaptado de Huang et al., 2008 e 2001.

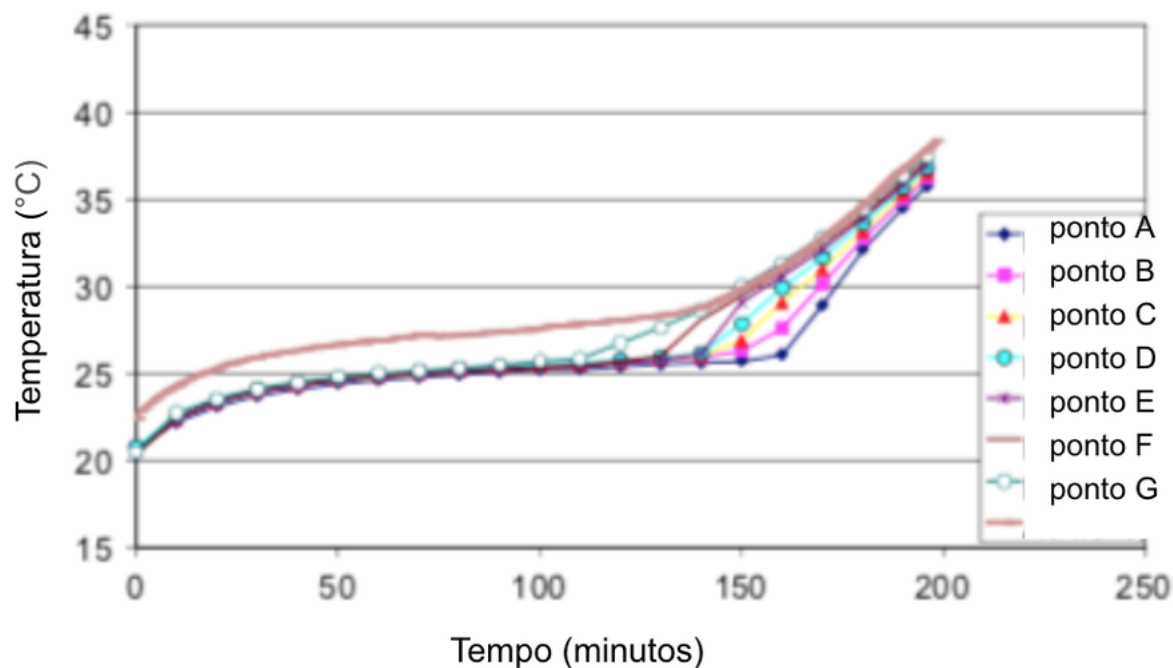


Figura 27 – Resultados de temperatura por tempo no sistema com aletas espaçadas a cada 8mm.

Fonte: adaptado de Huang et al., 2008 e 2001.

3.3.3 Volume do contêiner (espessura do PCM)

Continuando a análise dos dados de Hasan *et al.* (2009) mostrada pelas figuras 28 e 29 (aumento da espessura de 3 cm para 5 cm, mas com a mesma condutividade do material), a área sob a curva é maior e leva-se mais tempo para a temperatura estabilizar na de 5 cm, o que é indicativo de um melhor controle de temperatura, uma vez que leva-se mais tempo para atingir as mesmas temperaturas.

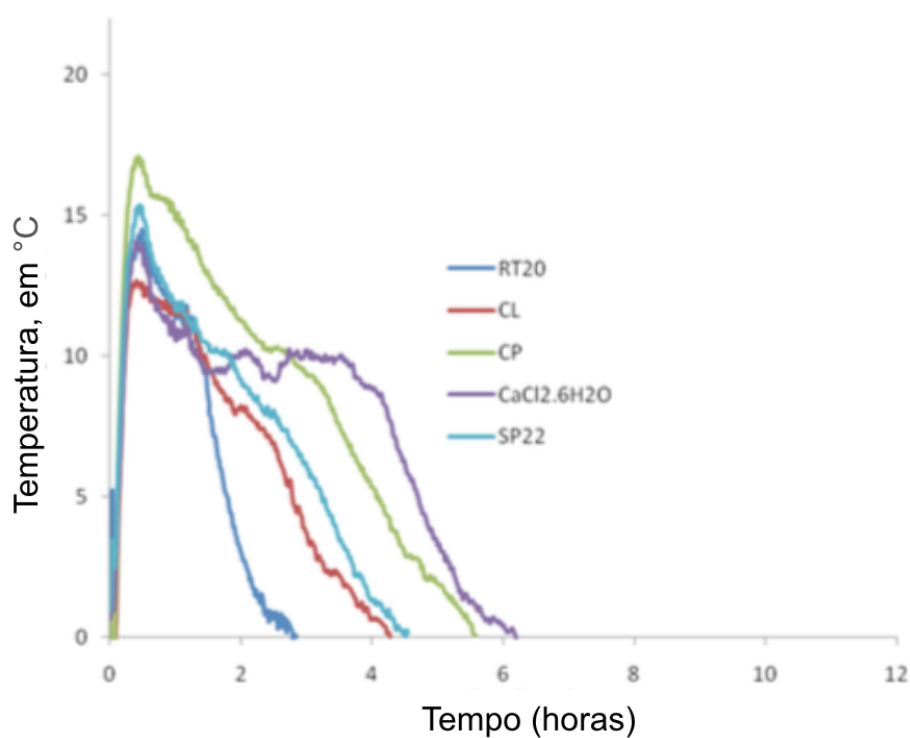


Figura 28 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de 3 cm de espessura.

Fonte: adaptado de Hasam et al, 2009.

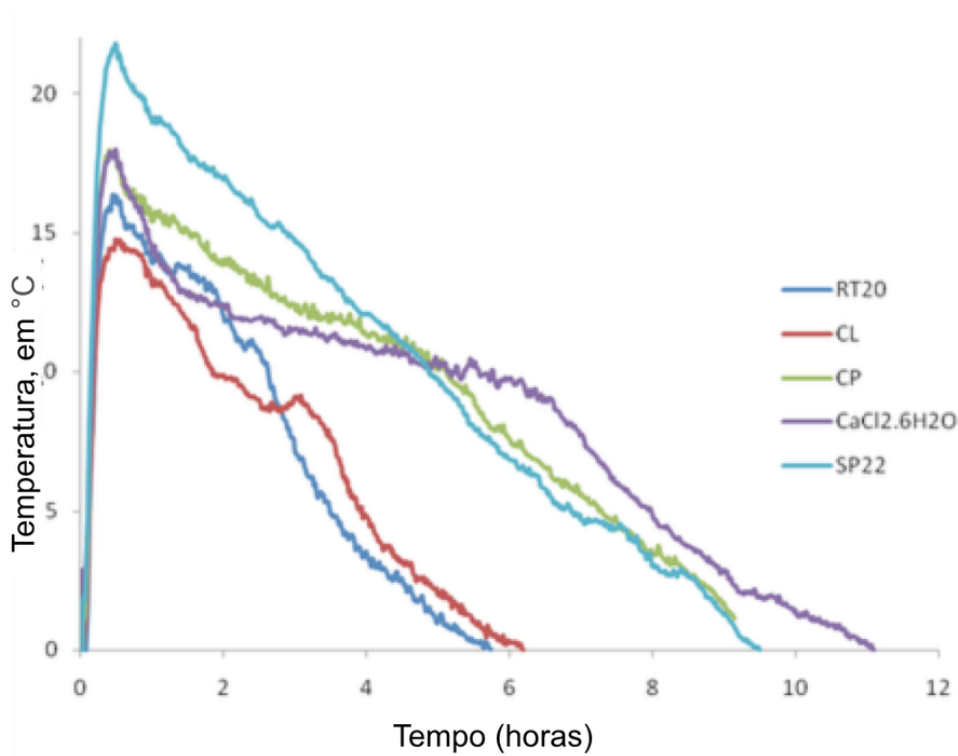


Figura 29 – Curva de temperatura por tempo para os 5 PCMs do experimento, para contêiner de 5 cm de espessura.

Fonte: adaptado de Hasan et al., 2009.

3.4 Seleção de Materiais de Mudança de Fase

3.4.1 Propriedades desejáveis

Para serem mais adequados à aplicação como PCMs em sistemas solares, algumas características são descritas como desejáveis por Iten e Liu (2014), Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011), Hasan *et al.* (2014) e Ma *et al.* (2015):

- **Propriedades térmicas:**

Alto calor latente de fusão: para aceitar altas quantidades de energia até mudar de fase, para absorver o máximo de calor do PV. Para que o volume requerido do contêiner não precise ser grande para armazenar grandes quantidades de energia.

Alto calor específico: para que exista uma capacidade adicional de armazenamento de calor sensível também.

Alta capacidade térmica: relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a variação de temperatura observada neste, para que haja pouco aquecimento (sensível).

Alta condutividade térmica: para que a remoção e transferência (carga e descarga) de calor sejam mais eficientes.

Mudança de fase reversível, sem degradação: para que o material passe por ciclos de aquecimento e resfriamento durante o dia e noite, sem que haja danos ao PCM.

Ponto de fusão não variável: para que haja um comportamento consistente do material.

- **Propriedades físicas:**

Fusão congruente: de forma que haja mínimo gradiente térmico possível, e que a capacidade de armazenamento do material seja constante a cada ciclo de fusão/congelamento.

Baixa variação volumétrica nas transformações de fase: para que não seja necessário projetar um contêiner além do requerido.

Alta densidade: para o contêiner poder ser menor.

Separação de fases: não é ideal que o material sofra qualquer tipo de separação dentro do contêiner, para que as propriedades de uma região não sejam diferentes de outra.

- **Propriedades cinéticas:**

Baixo grau de super resfriamento: para facilitar o congelamento, evitando o super congelamento da fase líquida.

Altas taxas de nucleação e de solidificação.

Boa taxa de cristalização: solidificação mais rápida.

- **Propriedades químicas:**

Estabilidade química: vida longa do material.

Não corrosivo: melhoria da longevidade do contêiner.

Não inflamável, não corrosivo, não tóxico: sempre visando à segurança, especialmente para aplicações em casas e prédios.

- **Propriedades econômicas:**

Abundância: para garantir que seja competitiva no mercado a solução de integração de PVs com PCMs.

Barato e rentável: viabilidade econômica e penetração no mercado.

- **Propriedades ambientais:**

Reciclável, reutilizável: deve ser fácil de se descartar.

Livre de odores: para ser possível aplicar em ambientes de proximidade com seres humanos, como em fachadas de edifícios.

Todas essas características são desejáveis em um PCM, porém, existe uma ordem de prioridade que deve ser seguida, de forma que algumas delas serão preteridas em prol do projeto.

Segundo Iten e Liu (2014), o primeiro fator de escolha é a temperatura de trabalho do material. O diagrama visto na figura 30 resume as faixas de temperatura de fusão e entalpia de fusão. Percebe-se que dentro das temperaturas de fusão entre 0°C e 100°C, os materiais ideais seriam água, hidratos de gás, parafinas ou sais hidratados e suas misturas. A figura 31 mostra as temperaturas de fusão olhando apenas para materiais de interesse para aplicações solares, em comparação com a água.

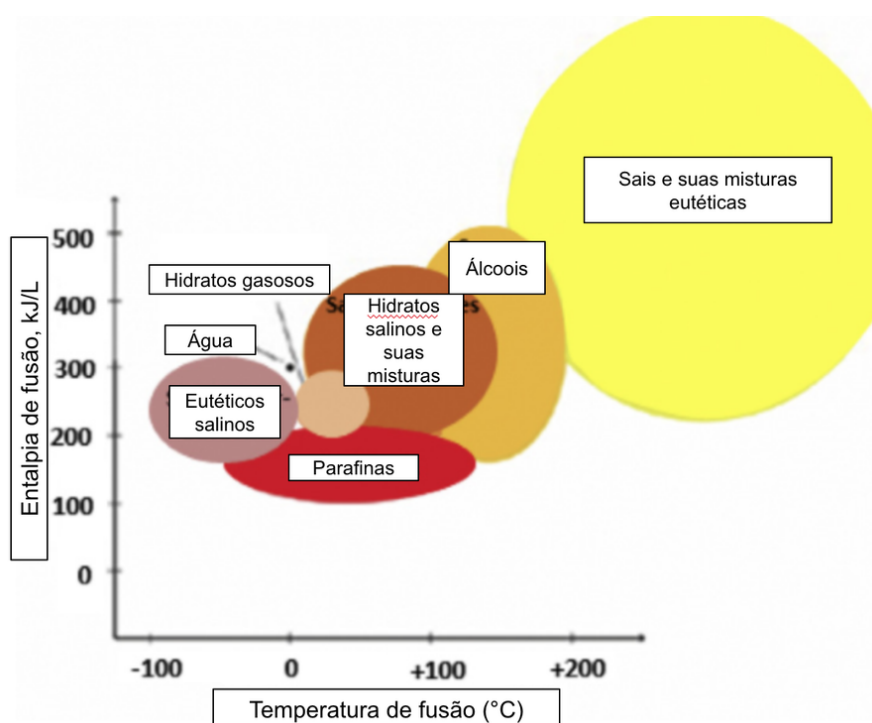


Figura 30 – Entalpias de fusão de PCMs versus suas temperaturas de fusão.

Fonte: adaptado de Iten e Liu, 2014.

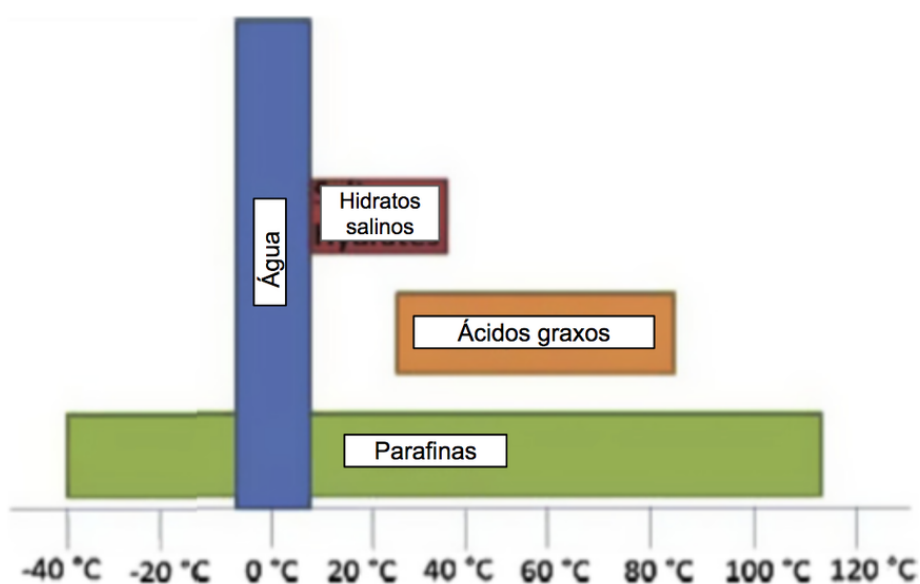


Figura 31 – Principais temperaturas de fusão de PCMs.

Fonte: adaptado de Iten e Liu, 2014.

A partir desse ponto da fase de seleção, é necessário se aprofundar mais nas características do projeto e traduzi-las para os materiais, e para observar mais a fundo cada material, é importante conseguir comparar as características com mais detalhes, por exemplo por meio das especificações fornecidas pelos fabricantes (ITEN; LIU, 2014).

3.4.2 Comparação entre principais PCMs usados

Em regras gerais, materiais PCMs inorgânicos são mais favoráveis quanto a suas entalpias de mudança de fase, mas desfavoráveis em se tratando de corrosão, separação e segregação de fases e falta de estabilidade térmica (ITEN; LIU, 2014).

Assim, por mais que PCMs orgânicos tenham menores entalpias de mudança de fase, menor condutividade térmica e possam ser inflamáveis, eles não são corrosivos, e tem boa estabilidade térmica e química, o que os torna opções muito atrativas para a aplicação em questão (ITEN; LIU, 2014).

Comparando-se as parafinas, as de uso comercial são baratas e têm capacidades moderadas de armazenamento (entre 200 kJ/m^3 e 120 MJ/m^3), amplas faixas de temperatura de fusão, são quimicamente inertes e não tem separação de fase, porém, apresentam baixa condutividade térmica. Já as parafinas puras são caras demais para tal uso (ITEN; LIU, 2014).

Os sais hidratados são interessantes nessa aplicação, uma vez que possuem alta densidade, alta condutividade térmica, e custos moderados se comparados com ceras de parafina, porém, apresentam também características como super-resfriamento e separação de fases, sendo necessário uso de agentes nucleantes e espessantes para corrigir, o que acaba por prejudicar outros aspectos do material, como sua capacidade de armazenamento de energia (ITEN; LIU, 2014).

Zalba *et al.* (2003) e Iten e Liu (2014) indicaram que compostos comuns de serem aplicados na indústria de construção e armazenamento de energia são:

Inorgânicos Não Comerciais:

Exemplos: $\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Orgânicos Não Comerciais:

Exemplos: Ácidos Cápricos, Parafinas C16–C18 e Dimetil Sabacato.

PCMs Comerciais:

Exemplos: RT20, RT25, RT27, ClimSel C 23, ClimSel C 24 e S27.

Os quais são os nomes comerciais dos PCMs produzidos e comercializados por Rubitherm GmbH (<http://www.rubitherm.de/>), Climator (<http://www.climator.com/>), e Cristopia (<http://www.cristopia.com/>), que carregam, respectivamente, os sufixos RT, ClimSel e S. Na figura 32, Iten e Liu (2014) apresentaram algumas das propriedades de PCMs comuns e seus produtores.

PCM	Tipo de produto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)	Densidade (kg/m ³)	Preço (£)	Fornecedores
TH-10	n.a	-10	283	n.a	n.a	TEAP Energy Products
STL-6/SN06	soluções salinas	-6	284	1.07	n.a	Mitsubishi Chemical Corporation
TH-4	n.a	-4	286	n.a	n.a	TEAP Energy Products
STL-3/SN03	soluções salinas	-3	328	1.01	n.a	TEAP Energy Products
ClimSel C 7	n.a	7	130	n.a	7	Climator
E7	n.a	7	120	1.54	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
E8	n.a	8	140	1.47	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
RTa6	parafina	8	174	0.86	6	Rubitherm Technologies GmbH
E10	n.a	10	140	1.52	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
E13	n.a	13	140	1.78	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
ClimSel C 15	n.a	15	130	n.a	7	Climator
E21	n.a	21	150	1.48	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
RT 20	parafina	22	172	0.87	8.3	Rubitherm Technologies GmbH
A22	n.a	22	220	0.775	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
ClimSel C 23	hidrato salino	23	148	1.48	6	Climator
ClimSel C 24	hidrato salino	24	216	1.48	6	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
TH 25	hidrato salino	25	159	n.a	n.a	TEAP Energy Products
RT 25	parafina	26	232	0.8	6.4	Rubitherm Technologies GmbH
STL27	hidrato salino	27	213	1.09	n.a	Mitsubishi Chemical Corporation
S27	hidrato salino	27	207	1.47	n.a	Cristopia Energy Systems
A28	n.a	28	245	0.79	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.
RT 27	parafina	28	179	0.87	6.2	Rubitherm Technologies GmbH
RT30	parafina	28	206	n.a	7.8	Rubitherm Technologies GmbH
TH29	hidrato salino	29	188	n.a	n.a	TEAP Energy Products
E30	n.a	30	201	1.3	n.a	Environment Processing System Limited, EPS Ltd.

Figura 32 – Dados de PCMs comuns no mercado e seus fornecedores.

Fonte: adaptado de Iten e Liu (2014).

3.4.3 Maior condutância do PCM leva a um uma maior geração de energia

Simulações de Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011) encontraram uma relação entre condutância do PCM e o desempenho energético do painel: quanto maior a condutância, maior a energia gerada, como visto na figura 33. Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011) demonstraram que um aumento na condutividade de 10% pode elevar a produção de energia elétrica do painel em 3%, porém, para isso ocorrer, um PCM novo teria de ser usado. Aumentos menos significativos de condutância do sistema podem ser obtidos ao se inserir aletas, redes ou encapsulamentos no PCM (MALVI; DIXON-HARDY; CROOK, 2011).

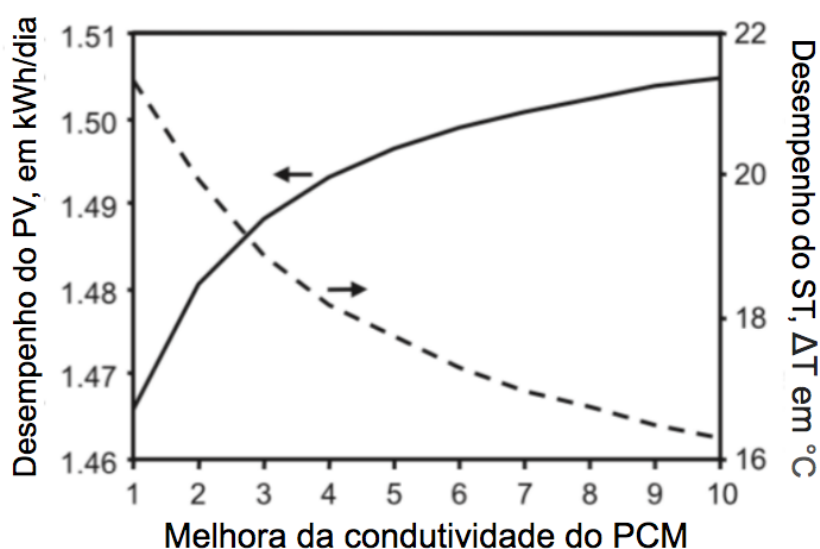


Figura 33 – Representação dos desempenhos (em kWh/dia) do PV e do ST associados em um mesmo sistema em função do aumento da condutância do PCM.

Fonte: adaptado de Ma et al, 2015.

4 Integração com sistemas heliotérmicos (PV-ST-PCM, ou PV/T)

Já se sabe que PCMs têm um importante papel na regulação da temperatura de painéis solares, e como a viabilidade do projeto é um fator crítico de decisão, a ideia de se aproveitar a energia térmica armazenada no PCM é muito atrativa ao mesmo tempo que pouco explorada (MA *et al.*, 2015). Em geral, em lugares frios, a energia térmica requerida para aquecimento chega a 50% da energia total consumida em um edifício (MA *et al.*, 2015).

Os módulos conhecidos por PV/T, ou PV-ST-PCM, se integram a um sistema heliotérmico (representado no nome por /T ou ST). O funcionamento, como descrito por Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011), se dá da seguinte maneira: o PCM primeiramente serve para remover o excesso de calor e em seguida para levar parte do calor capturado para outros sistemas na construção que gerarão água quente, aquecimento, ventilação e outros processos. Sendo assim, quanto mais energia térmica for retirada do PCM e aproveitada, mais pode-se abaixar a temperatura do PV e melhorar sua produção de energia. O sistema PV/T foi primeiro sugerido por Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011), de forma que a tecnologia ainda é muito recente e pouco explorada.

4.1 Sistema usual do PV-ST-PCM

O PV-ST-PCM costuma apresentar a estrutura representada na figura 34, em que células PV são montadas em cima de uma placa de cobre com tubos anexos e o PCM é acoplado. Ambos PCM e água nos tubos são responsáveis por absorver o excesso de calor das células PV. Água é aquecida no tanque pelo calor vindo dos canos que se originam do painel e tem ligação externa para fornecimento de água quente onde for requerido Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011).

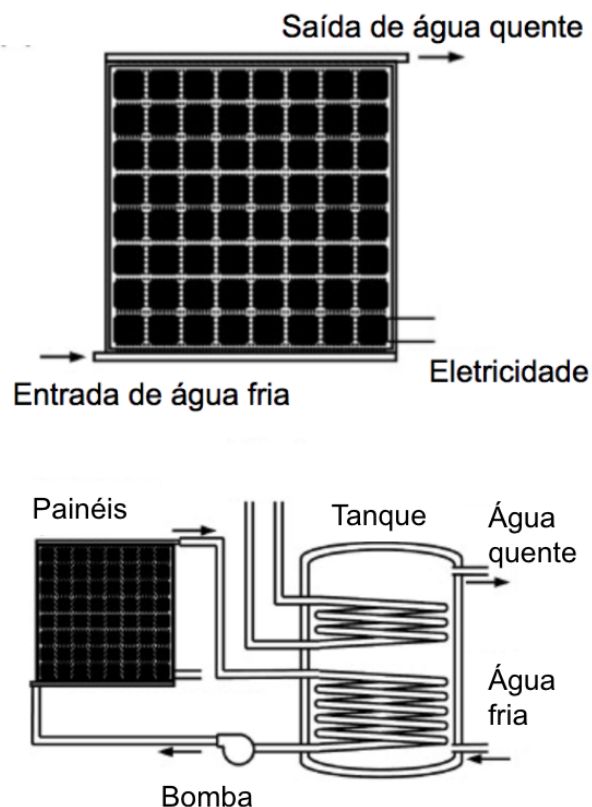


Figura 34 – Esquema convectivo do PV-ST-PCM proposto por Malvi, Dixon-Hardy e Crook (2011).

Fonte: adaptado de Malvi, Dixon-Hardy e Crook, 2011.

Quando que se associa um PV a um sistema térmico, porém, aumentar o desempenho de um deles significa deteriorar a do outro. Por exemplo, em um sistema PV-ST-PCM, por se utilizar o PCM, ele limita o pico da temperatura do painel nos momentos mais quentes do dia, o que limita, portanto, o pico de temperatura de aquecimento da água (MA *et al.*, 2015). Como mostrado na seção anterior, a figura 33 mostra a relação complementar de eficiência entre o sistema PV e o sistema térmico, associados a um mesmo módulo.

5 Desafios

Analisando anos de publicações sobre PCMs, Kenisarin e Mahkamov (2007) e Wei *et al.* (2018) apontaram pontos importantes de incertezas sobre as propriedades e aplicações de PCMs para armazenamento de energia, tais como:

- É difícil concluir se as pesquisas avaliadas foram conduzidas com PCMs disponíveis comercialmente, de forma que a reprodução dos resultados desses estudos é questionável. Ainda, as pesquisas disponíveis hoje envolvendo PCMs não fornecem informações completas sobre as propriedades termofísicas dependentes da temperatura.
- Os PCMs disponíveis comercialmente diferem em suas especificações, levantando a questão de eles possuírem métodos padronizados de avaliação dessas propriedades. Mesmo quando há informação sobre os custos de um PCM, é difícil determinar se é factível usá-lo em aplicações solares.
- Não há um padrão internacional de normalização de testes de PCMs. Dessa forma, valores de propriedades como temperatura de mudança de fase, condutividade térmica, e calor latente de fusão para um mesmo material podem diferir muito na literatura. Idealmente, sempre que se tivessem os resultados de um estudo com PCMs, deveriam também estar claramente indicados a fonte do material, o método e as condições de testes do mesmo, garantindo-se a precisão e rigor dos dados.
- Poucos estudos avaliam a constância das propriedades térmicas dos materiais durante suas mudanças de fase e transferências de calor. A dependência da temperatura para certas propriedades, tais como condutividade térmica, por exemplo, ainda foi muito pouco estudada.
- Não se sabe quanto as propriedades termofísicas de PCMs foram investigadas e quão confiáveis são os resultados.

Em 19 de dezembro de 2016, haveria no Brasil um leilão de reservas de energia eólica e solar, o qual foi cancelado com uma semana de antecedência (EXAME.COM, 14/12/2016). No país hoje, esses tipos de leilões são a principal forma de contratação de energia. A justificativa para o mesmo foi que no Brasil as demandas de energia haviam caído 1,6% nos últimos 12 meses, especialmente por causa da queda de demandas industriais (GAYLORD, 22/12/2016).

O ano de 2016 foi um ano em que vários países dobraram suas capacidades instaladas de energia solar, de forma que o Brasil teve sua indústria dessas energias renováveis desfavorecida no exato momento em que outras várias nações tinham seus momentos de ascendência, o que hoje se traduz em um mercado de energia solar mais fraco do que se esperaria, dificultando avanços e investimentos na área (GAYLORD, 22/12/2016).

Em geral, para que o sistema seja implementado de uma forma mais viável, com integração à rede elétrica e de aquecimento de um prédio, necessita-se alterar o projeto da construção, que muitas vezes inviabiliza tais iniciativas se não forem pensadas desde o início. É necessário avaliar-se minuciosamente o tempo de retorno de um investimento de implementação de um sistema PV-PCM, avaliando-se se o aumento de energia gerada esperado e compensa o custo de aquisição de tal modelo

As eficiências do sistema heliotérmico e do fotovoltaico se diminuem mutuamente, de forma que deve-se escolher qual eficiência será preterida em função da outra. Porém, este tipo de escolha pode ser variável durante o ano (especialmente durante verão e inverno), e de aplicação para aplicação, de forma que possivelmente o sistema necessite ser mutável nesse aspecto.

Nesse trabalho, muito se abordou sobre técnicas diferentes de controle da temperatura do PV, todas trazendo resultados favoráveis ao menos em algum aspecto. Nenhum estudo até hoje se propôs a combinar várias abordagens diferentes, por exemplo, usar aletas, PCMs mais condutores e contêiner mais condutor, e avaliar a melhoria de desempenho dos sistemas obtidos. Para tornar cada vez mais viável a produção de um projeto desses, seria interessante garantir que se combinam todas as melhores tecnologias disponíveis.

6 Resultados das técnicas apresentadas

6.1 Ativas

Ji *et al.* (2008) obteve em seu sistema de bomba térmica via coletor solar (SAHP) uma melhora máxima de 34% na eficiência do modelo.

Krauter (2004) com seu sistema de filme d'água unido a uma bomba apresentou uma melhora máxima de 10% na eficiência, com redução da temperatura em 22°C.

Wilson (2009) propôs um filme d'água movimentado por gravidade, o qual obteve melhora de 12,8% na eficiência energética, e uma temperatura até 32°C menor.

6.2 Passivas

Zhang *et al.* (2012) conseguiu uma melhoria máxima de 2,5% na eficiência energética de seu sistema de circulação passiva de ar, com redução de temperatura de por volta de 4,7°C.

Também Zhang *et al.* (2012) com um sistema passivo de circulação de água, conseguiu um aumento de em média 3% na eficiência do modelo, com redução da temperatura de até 8°C.

6.3 PCMs

Smith, Forster e Crook (2014): em um ano testes obteve melhora na eficiência de até 6,8%, redução da temperatura de até 19°C em determinados momentos.

Huang, Eames e Norton (2006) aponta resultados de simulações que a eficiência chegou a melhorar 7.5% com uma diferença de temperatura de 17°C versus um sistema sem PCM.

6.4 Síntese de resultados

A tabela 4 coloca em perspectiva os resultados de algumas técnicas apresentadas neste trabalho de revisão. Pode-se observar que os meios ativos de controle da temperatura apresentam melhores resultados de redução de temperatura e de

eficiência do módulo. Também nota-se que os PCMs apresentam melhores resultados do que as técnicas passivas comuns, mesmo que ainda menos desejáveis que os resultados das técnicas ativas.

Tabela 4 – Comparação dos resultados de controle de temperatura e eficiência por meio de diferentes técnicas.

	Meio Ativo	Meio Ativo	Meio Ativo	Meio Passivo	Meio Passivo	Meio Passivo (PCM)	Meio Passivo (PCM)
Técnica	Bomba SAHP	Bomba + filme d'água	Gravidade	Ar	Água	Cera de parafina*	Parafina
Autores	Ji <i>et al.</i> (2008)	Krauter (2004)	Wilson (2009)	Zhang <i>et al.</i> (2012)	Zhang <i>et al.</i> (2012)	Smith, Forster e Crook (2014)	Huang, Eames e Norton (2006)
Aumento de eficiência	34%*	10%	12,8%	2,5%	3%	6,8%	7,5%
Redução de temperatura	Não registrado	22°C	32°C	4,7°C	8°C	19°C	17°C

7 Conclusão

Como explicado na seção 6, em geral, observa-se que podem-se ter melhores resultados com circulação de fluidos (especialmente água) no painel do que com PCMs, mas deve-se lembrar que essas circulações mais eficientes, as forçadas, têm gastos energéticos significativos.

Ainda, esses resultados fazem sentido uma vez que a cada grau que aumenta a temperatura, sua eficiência cai. Para um sistema de fato mais eficiente, precisa-se combinar medidas que gastem muito pouca energia em comparação ao quanto elas gastam.

Para selecionar um PCM, é necessário satisfazer propriedades cinéticas, termodinâmicas, químicas e econômicas. Em aplicações práticas, é muito raro que materiais satisfaçam todas essas propriedades ao mesmo tempo, de forma que é necessário existir alternativas para se compensar as propriedades que não são supridas naquele material e suas deficiências (WEI *et al.*, 2018).

Em geral, são problemas associados à aplicação de PCMs: separação/segregação de fase, baixa condutividade térmica, super-resfriamento, mudanças na densidade, má estabilidade do material a longo prazo sob efeito de vários ciclos, corrosão e incompatibilidade com os materiais do contêiner (ITEN; LIU, 2014).

No Brasil e no mundo há muito potencial para tecnologias solares, mas ainda existe muito espaço para desenvolvimento do tema, uma vez que grande parte dos desenvolvimentos é recente, datando desde 2000 até o presente, de forma que a tecnologia provavelmente demora a ser comercializada.

Referências

- AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2548 – 2569, 2018. ISSN 1364-0321.
- BIBLIOTECA DIPLÔ. Cronologia da OPEP. *Energia II*, 01/05/2006.
- BIWOLE, P.; ECLACHE, P.; KUZNIK, F. Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials. *World Renewable Energy Congress*, p. 2953 – 2960, 2011.
- BRINKWORTH, B.; MARSHALL, R.; IBARAHIM, Z. A validated model of naturally ventilated PV cladding. *Solar Energy*, v. 69, n. 1, p. 67 – 81, 2000. ISSN 0038-092X.
- BRINKWORTH, B. J. *et al.* Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy*, v. 61, n. 3, p. 169 – 178, 1997. ISSN 0038-092X.
- BUBENZER, A.; LUTHER, J. *Photovoltaics Guidebook for Decision-Makers*. [S.l.]: Springer, 2003.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional 2017. Ano base: 2016*. Rio de Janeiro, 2017.
- EXAME.COM. Governo cancela leilão de energia eólica e solar. *Exame*, 14/12/2016.
- FLEISCHER, A. *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials: Fundamentals and Applications*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2015. (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology). ISBN 9783319209227.
- GAYLORD, B. Brazilian Auction Cancellation Is Understandable Yet Still Inadvisable. *Make*, 22/12/2016.
- GOOGLE NGRAM VIEWER. 2018. Acesso em: 06/05/2018.
- HASAN, A. *et al.* Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method. *Energy Conversion and Management*, v. 81, p. 322 – 329, 2014. ISSN 0196-8904.
- HASAN, A. *et al.* Phase change materials for thermal control of building integrated photovoltaics: characterisation and experimental evaluation. *Proceedings of the 11th international conference on thermal energy storage*, 2009.
- HUANG, M.; EAMES, P.; NORTON, B. Chapter 454 - The Application of Computational Fluid Dynamics to Predict the Performance of Phase Change Materials for Control of Photovoltaic Cell Temperature in Buildings. In: SAYIGH, A. (Ed.). *World Renewable Energy Congress VI*. Oxford: Pergamon, 2000. p. 2123 – 2126. ISBN 978-0-08-043865-8.
- HUANG, M.; EAMES, P.; NORTON, B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 47, n. 12, p. 2715 – 2733, 2004. ISSN 0017-9310.

- HUANG, M.; EAMES, P.; NORTON, B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, v. 80, n. 9, p. 1121 – 1130, 2006. ISSN 0038-092X.
- HUANG, M. *et al.* Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 95, n. 7, p. 1598 – 1603, 2011. ISSN 0927-0248.
- HUANG, M. J. *et al.* The Effect of Phase Change Material Crystalline Segregation on the Building Integrated Photovoltaic System Thermal Performance. *World Renewable Energy Congress (WRECX)*, 2008.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook*. [S.l.], 2013. Acesso em: 22/04/2018.
- ITEN, M.; LIU, S. A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems. *Energy Conversion and Management*, v. 77, p. 608 – 627, 2014. ISSN 0196-8904.
- JI, J. *et al.* Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. *Solar Energy*, v. 82, n. 1, p. 43 – 52, 2008. ISSN 0038-092X.
- KENISARIN, M.; MAHKAMOV, K. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, n. 9, p. 1913 – 1965, 2007. ISSN 1364-0321.
- KRAUTER, S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 82, n. 1, p. 131 – 137, 2004. ISSN 0927-0248. CANCUN 2003.
- LONDON METAL EXCHANGE (LME). *Featured LME Prices*. Disponível em: <<https://www.lme.com/>>. Acesso em: 18/05/2018.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2011.
- MA, T.; YANG, H.; LU, L. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy*, v. 121, p. 149 – 158, 2014. ISSN 0306-2619.
- MA, T. *et al.* Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 1273 – 1284, 2015. ISSN 1364-0321.
- MALVI, C.; DIXON-HARDY, D.; CROOK, R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. *Solar Energy*, v. 85, n. 7, p. 1440 – 1446, 2011. ISSN 0038-092X.
- MARKVART, T.; BOGUS, K. *Solar electricity*. [S.l.]: Wiley, 1994. (Energy engineering learning package). ISBN 9780471941613.
- PV MAGAZINE. Brazil hits 1 GW solar milestone. 09/01/2018.

REINDERS, A.; VERLINDEN, P.; FREUNDLICH, A. *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*. [S.l.]: Wiley, 2016.

SAIKRISHNAN, V.; KARTHIKEYAN, A. Thermal behaviour study of phase change material of a latent heat storage system. *Materials Today: Proceedings*, v. 3, n. 6, p. 2518 – 2524, 2016. ISSN 2214-7853. Recent Advances In Nano Science And Technology 2015.

SANDBERG, M. Cooling of Building Integrated Photovoltaics by Ventilation Air. In: *First International One day Forum on Natural and Hybrid Ventilation*. Sydney: [s.n.], 1999.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, v. 83, n. 5, p. 614 – 624, 2009. ISSN 0038-092X.

SMITH, C. J.; FORSTER, P. M.; CROOK, R. Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied Energy*, v. 126, p. 21 – 28, 2014. ISSN 0306-2619.

THE ECONOMIST. Sunny uplands: Alternative energy will no longer be alternative. *The Economist: Science and technology*, 21/11/2012.

THE NEW YORK TIMES. American Inventor Uses Egypt's Sun for Power. *The New York Times*, 02/07/1916.

TONUI, J.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, v. 32, n. 4, p. 623 – 637, 2007. ISSN 0960-1481.

WEI, G. *et al.* Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 1771 – 1786, 2018. ISSN 1364-0321.

WELLER, M. *et al.* *Química Inorgânica*. [S.l.]: Bookman, 2017. ISBN 9788582604410.

WILSON, E. Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions. *Renewable Energy*, v. 34, n. 6, p. 1655 – 1660, 2009. ISSN 0960-1481.

YUN, G. Y.; MCEVOY, M.; STEEMERS, K. Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade. *Solar Energy*, v. 81, n. 3, p. 383 – 394, 2007. ISSN 0038-092X.

ZALBA, B. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, n. 3, p. 251 – 283, 2003. ISSN 1359-4311.

ZHANG, X. *et al.* Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 599 – 617, 2012. ISSN 1364-0321.

ZWEIBEL, K.; HERSCH, P. *Basic Photovoltaic Principles and Methods*. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1984. ISBN 9780442281267.